

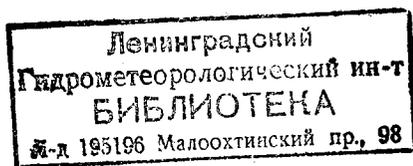
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Л. П. СЕРЯКОВА

# АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Учебное пособие

*Допущено Министерством высшего и среднего специального  
образования СССР в качестве учебного пособия  
для студентов вузов, обучающихся по специальности  
«Метеорология»*



ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД  
1978

*Одобрено Ученым советом Ленинградского гидрометеорологического института*

В учебном пособии излагаются основные сведения о влиянии метеорологических условий на рост и развитие растений, особенностях фитолимата полей, неблагоприятных для растений метеорологических условиях. Особое внимание уделяется анализу метеорологической эффективности мероприятий по борьбе с неблагоприятными условиями. Рассматриваются основные принципы агрометеорологических наблюдений и обслуживания сельского хозяйства агрометеорологической информацией. Излагаются некоторые методы агрометеорологических прогнозов.

Предназначается для студентов метеорологической специальности гидрометеорологических институтов и университетов.

Рецензенты:

кафедра агрометеорологии Одесского гидрометеорологического института, доктор географических наук Н. А. Ефимова (Государственный гидрологический институт).

Работа выполнена в Ленинградском гидрометеорологическом институте.



## Глава I. ВВЕДЕНИЕ

### § 1. ПРЕДМЕТ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АГРОМЕТЕОРОЛОГИИ

Агрометеорология (сельскохозяйственная метеорология) — наука, изучающая метеорологические, климатические и гидрологические условия, имеющие важное значение для сельского хозяйства, в их взаимодействии с объектами и процессами сельскохозяйственного производства.

Объектами агрометеорологических исследований являются погода и климат (условия среды), с одной стороны, растения и другие объекты сельскохозяйственного производства — с другой. Предмет изучения агрометеорологии — взаимодействие растений (животных, болезней растений, вредителей и др.) с климатом и погодой. Следовательно, агрометеорологии изучает климат и погоду как условия обитания сельскохозяйственных объектов, устанавливает степень соответствия этих условий требованиям живых организмов в разных климатических районах, исследует влияние неблагоприятных метеорологических условий на процессе их роста и развития. Больше других развит раздел агрометеорологии, посвященный изучению влияния среды на растениеводство.

Агрометеорология — наука комплексная, непосредственно связанная с физическими науками — метеорологией, климатологией, гидрологией и науками биологического профиля — физиологией, агрономией, почвоведением, экологией, — достижения которых она использует. В связи с этим методы агрометеорологических исследований, целью которых является установление связи между гидрологическими условиями и состоянием объектов сельскохозяйственного производства, отличаются от метеорологических. В настоящее время используются следующие методы:

- 1) параллельных наблюдений за метеорологическими условиями и состоянием растений, разработанный П. И. Броуновым;
- 2) учащенных сроков сева, при котором одни и те же метеорологические условия воздействуют на растения, находящиеся в разных фазах развития;
- 3) географических посевов, позволяющий путем выращивания одного и того же сорта растений в разных климатических условиях выявить наиболее благоприятный их комплекс;

4) лабораторных опытов, например в камерах искусственного климата, а также полевые эксперименты;

5) климатического анализа ареалов и границ распространения культурных растений с учетом их продуктивности, впервые использованный А. И. Воейковым.

Основная цель агрометеорологических исследований состоит в улучшении оперативного агрометеорологического обслуживания сельского хозяйства и наиболее полным удовлетворении его запросов. Задачи агрометеорологических исследований:

1. Изучение агрометеорологических условий и в особенности неблагоприятных для сельского хозяйства метеорологических явлений (засухи, суховея, заморозков и др.).

2. Агрометеорологическое обоснование системы мероприятий (полезащитного лесоразведения, системы обработки почвы, обводнения, орошения, защищенного грунта и др.) и приемов борьбы с неблагоприятными климатическими факторами и приносящими вред метеорологическими явлениями. Расчет эффективности этих приемов и районирование их при наиболее рациональном сочетании отдельных искусственно создаваемых климатических условий.

3. Агроклиматическое описание и районирование территории СССР с целью обоснования наиболее рационального размещения сельскохозяйственного производства (земледелия, животноводства и др.) и мероприятий, обеспечивающих получение высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур, повышение продуктивности животноводства и успешное выращивание полезных насаждений.

4. Разработка и усовершенствование методов агрометеорологических прогнозов и информации.

5. Усовершенствование и удешевление методов агрометеорологических наблюдений, разработка новых приборов.

6. Разработка методики и приемов гидрометеорологического обслуживания колхозов и совхозов.

7. Математическое моделирование агрометеорологических процессов.

В своем развитии агрометеорология прошла сложный путь. Ее зарождение относится к очень древнему времени, когда человек делал первые шаги в борьбе с неблагоприятными для сельского хозяйства метеорологическими явлениями. С глубокой древности известны некоторые приемы этой борьбы, например полив, укрытие теплолюбивых культур на зиму, разведение посевов в горных районах на верхних участках склонов и т. д.

В начальный период агрометеорология развивалась в недрах метеорологии. Первые метеорологические наблюдения датированы V в. до н. э. и проводились в Древней Греции. В это время уже были приборы для измерения количества осадков, скорости и направления ветра и т. д. Приблизительно к этому же периоду относится появление первого научного труда по метеорологии, напи

санного Аристотелем (350 лет до н. э.). Дальнейшее развитие метеорологии вообще и агрометеорологии в частности связано с именами таких крупнейших ученых мира, как Галилей, Ньютон, Паскаль, Реомюр, Торичелли и др.

Первые сведения о метеорологических явлениях в России находят в древних летописях, письмах землепроходцев. Систематические метеорологические наблюдения в нашей стране были начаты в Петербурге в 1722 г. Однако основные задачи метеорологического обслуживания сельского хозяйства были сформулированы только во второй половине XVII в. М. В. Ломоносовым. В 1758 г. в одном из своих выступлений в Академии наук М. В. Ломоносов отметил: «Предсказание погоды сколь нужно и полезно на земле, ведаёт больше земледелец, которому во время сеяния и жатвы ведро, во время рашения дождь, благорастворенный теплотою, надобен».

Идеи М. В. Ломоносова значительно опередили свое время. Условия для их осуществления появились только более чем через 100 лет. Однако многие ученые конца XVIII — начала XIX вв. указывали на необходимость и полезность для сельского хозяйства России изучения метеорологии, организовывали агрометеорологические наблюдения. Особенно много внимания агрометеорологии уделяли А. Т. Болотов, И. М. Комов и др. Важным событием явилось обобщение знаний по агрометеорологии, данное Д. Реутовичем в 1854 г. в книге «Сельскохозяйственная метеорология».

Но первыми, кто наиболее полно оценил и убедительно доказал необходимость проведения метеорологических наблюдений для нужд сельского хозяйства, были крупнейшие русские ученые А. И. Воейков и П. И. Брунов. В классическом труде А. И. Воейкова «Климаты земного шара, в особенности России» большое внимание уделено исследованию влияния климата на сельскохозяйственные культуры и растительности на климат. В работах А. И. Воейкова содержатся ценные рекомендации по выращиванию отдельных сельскохозяйственных культур, например чайного куста, хлопчатника, плодовых и т. д. Его агрометеорологические исследования, посвященные лесоразведению, орошению и осушению полей, снежному покрову и т. п., намного опередили современную ему науку и не утратили своего значения до настоящего времени. А. И. Воейков вел широкую пропаганду метеорологии. В 1885 г. по его инициативе были организованы первые 12 метеорологических станций, назначение которых состояло в проведении метеорологических наблюдений для нужд сельского хозяйства. Им же была составлена первая программа сельскохозяйственно-метеорологических наблюдений.

Начинания А. И. Воейкова были поддержаны А. В. Клоссовским, А. Н. Бекетовым и другими русскими учеными. Однако основоположником сельскохозяйственной метеорологии по праву признан П. И. Броунов. В 1896 г. по его инициативе и при личном участии было организовано метеорологическое бюро, которое факти-

ческий явилось первым в России и первым в мире научным учреждением по вопросам агрометеорологии. Это бюро приступило к организации сети агрометеорологических станций и созданию единой программы агрометеорологических наблюдений. С 1901 г. стали издаваться «Труды по сельскохозяйственной метеорологии», в которых публиковалось обобщение опыта работы сети агрометеорологических станций, результаты научных исследований. П. И. Броуну принадлежат важнейшие научные работы в области агрометеорологии, в частности исследования, посвященные анализу критических периодов в развитии растений, засухам, первая работа по агроклиматическому районированию России. В 1912 г. П. И. Броун опубликовал монографию «Полевые культуры и погода».

После Великой Октябрьской социалистической революции начался новый этап в развитии агрометеорологии в России. В 1921 г. декретом Совета труда и обороны, подписанным В. И. Лениным, была организована агрометеорологическая служба нашей страны. Деятельность П. И. Броунова в этот период стала особенно плодотворной.

В советское время работы по агрометеорологии приобрели большое значение, так как они помогают наиболее полному использованию природных ресурсов социалистическим сельским хозяйством. От старой агрометеорологической службы заимствованы лишь основные принципы агрометеорологических наблюдений. Сеть наблюдательных станций и система информации должны были создаваться заново. Агрометеорологические исследования в нашей стране стали многосторонними.

Большое развитие получили работы по наиболее рациональному размещению сельскохозяйственных культур, по оценке метеорологической эффективности мер борьбы с неблагоприятными условиями, разработке новых способов оперативного обслуживания всех отраслей сельского хозяйства и др. Создаются новые научные учреждения, ведущие агрометеорологические исследования, осуществляется подготовка кадров агрометеорологов. У истоков советской агрометеорологии стояли такие видные ученые, как С. И. Небольсин, П. И. Колосков, Г. Т. Селянинов. Большой вклад в отечественную агрометеорологию внесли Р. Э. Давид, С. А. Сапожникова, Ф. Ф. Давитая, И. А. Гольцберг, С. А. Вериго, Е. А. Цубербиллер, А. М. Алпатьев, А. М. Шульгин, Л. А. Разумова, М. И. Будыко, В. С. Мезенцев, Ю. И. Чирков, Е. С. Уланова, В. А. Моисейчик, В. В. Синельников, А. Р. Константинов, Н. Н. Яковлев и многие другие.

Научные исследования по агрометеорологии проводятся в агрометеорологических отделах зональных научно-исследовательских институтов, в ГГИ и ГМЦ СССР, на соответствующих кафедрах университетов и гидрометеорологических вузов, в отделе агрометеорологии Всесоюзного института растениеводства и других

учреждениях. Эти исследования базируются на материалы наблюдений сети станций гидрометеорологической службы.

За рубежом значительное развитие агрометеорология получила в ряде европейских стран, особенно в Италии, Великобритании, Франции. В настоящее время большие исследования в области агрометеорологии проводятся в Канаде. В СССР широко известны работы Дж. Ацци, А. Прескотта, Е. Мартона, А. Пенка, С. Торнтвейта, Л. Тюрка и др. После второй мировой войны агрометеорологические исследования стали интенсивно развиваться в социалистических странах. Большую роль в этом развитии сыграл опыт агрометеорологических исследований в СССР, методы которых используются в дружественных странах.

В последнее время расширяется международное сотрудничество в области агрометеорологии. Еще в 1913 г. в Риме при Международной метеорологической организации (ММО) была создана международная агрометеорологическая организация — Комиссия по агрометеорологии, в числе организаторов которой был виднейший русский агрометеоролог П. И. Броунов. В 1967 г. на четвертой сессии по сельскохозяйственной метеорологии при Всемирной метеорологической организации (ВМО) была создана специальная рабочая группа по агроклиматологии, состоящая из ведущих специалистов разных стран.

## § 2. АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Агрометеорологические исследования базируются на результатах наблюдений, выполняемых на агрометеорологических и метеорологических станциях и постах, в экспедиционных условиях.

Агрометеорологические наблюдения включают сопряженные наблюдения над метеорологическими элементами и состоянием сельскохозяйственных объектов (влажностью почвы, состоянием растений, условиями выпаса животных и т. д.). Наиболее густую сеть станций, выполняющих агрометеорологические наблюдения, составляют метеорологические станции II и III разрядов. Помимо этого агрометеорологические наблюдения выполняются на метеорологических постах I и II разрядов, расположенных в сельскохозяйственных районах страны, а также на агрометеорологических постах. В СССР агрометеорологические наблюдения проводятся более чем на 2500 гидрометеорологических станциях и постах, кроме того, в колхозах и совхозах работает более 12 000 агрометеорологических постов. Все наблюдения выполняются по типовой программе, установленной дифференцированно для станций и постов разных разрядов и изложенной в наставлении гидрометеорологическим станциям и постам, выпуск II. Наиболее полная программа наблюдений, включая тематические по специальной программе, выполняется на агрометеорологических станциях. Сеть этих станций значительно реже, чем метеорологических.

Основные задачи станций и постов по организации агрометеорологических наблюдений следующие:

— проведение наблюдений в районе расположения станций и постов;

— первичная обработка и контроль результатов наблюдений;

— составление информационных агрометеорологических донесений и передача их соответствующим учреждениям в установленные сроки;

— регулярное агрометеорологическое обслуживание ближайших колхозов, совхозов, сельскохозяйственных учреждений, состоящее в передаче всех видов прогнозов, предупреждений о неблагоприятных явлениях погоды, консультациях, справок и т. д.

В теплый период выполняются наблюдения за температурой пахотного поля, осадками на сельскохозяйственных полях, влажностью почвы, фазами развития растений, их состоянием, формированием элементов продуктивности. В холодный период наблюдения ведутся за температурой почвы на глубине залегания узла кущения озимых культур, влажностью почвы, глубиной промерзания и оттаивания, состоянием зимующих полевых культур и плодовых деревьев, снежным покровом.

Материалы наблюдений на станциях и постах подвергаются первичной обработке, в результате составляются таблицы, носящие шифр ТСХ. Результаты метеорологических и агрометеорологических наблюдений передаются со станций в гидрометеорологическое бюро (областные, краевые, республиканские) и Гидрометеорологический Центр СССР, где они используются для агрометеорологического обслуживания всех отраслей сельскохозяйственного производства.

Помимо наземных агрометеорологических наблюдений в последнее время значительную информацию дают авиационные визуальные и инструментальные обследования, методика которых существенно отличается от наземной. При авиационном визуальном обследовании, когда полет самолета проходит на небольшой высоте (около 100 м), фазы развития, засоренность посевов, их повреждения оцениваются по косвенным признакам: четкости рядков, степени покрытия почвы травостоем, цвету растений, количеству бурых пятен на темно-зеленом поле и т. д.

Визуальные авиационные обследования озимых культур проводятся осенью, в период прекращения вегетации, и весной, после возобновления ее. Яровые культуры обследуются в начальные фазы развития и в период созревания в районах, где зерновые могут повреждаться осенними заморозками. Пастбища обследуются в период максимального прироста надземной массы (май—июнь). Маршруты полета могут быть различными, но обычно они выбираются так, чтобы были обследованы поля с различными условиями развития и перезимовки растений. Трасса полета должна обязательно проходить через наблюдательные участки гидрометеоро-

рологических станций, материалы которых являются отправным моментом при обработке визуальных авиационных наблюдений.

Авиационные инструментальные обследования проводятся с помощью биометрического трубчатого фотометра (БТФ-1, БТФ-2, БТФ-3), предназначенного для определения различных параметров растительного покрова — густоты растений, площади листовой поверхности и др. — по отражательной способности растений. Принцип действия биометрического фотометра основан на определении контраста яркости системы почва — растительный покров. Высота полета самолета в зависимости от задачи обследования может быть различной — 50—2000 м. В настоящее время разрабатываются способы получения агрометеорологической информации с искусственных спутников Земли.



## Глава II. ЗНАЧЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Жизнь растений протекает при непрерывном взаимодействии с окружающей средой, представляющей собой комплекс метеорологических (климатических), гидрологических, почвенных, биотических (связанных с влиянием других растений или микроорганизмов) условий и факторов, определяемых деятельностью человека. Совокупность окружающих растения внешних факторов называется условиями среды. Не все элементы среды влияют на жизнь растений. Например, атмосферное давление, состав и строение атмосферы на высотах выше приземного слоя, оптические, акустические явления в атмосфере заметного влияния на жизнь растений не оказывают. Прочие метеорологические и гидрологические элементы непосредственно или косвенно влияют на рост и развитие растительных организмов. Основные элементы, определяющие процессы роста и развития растений, обычно называют факторами жизни. Таких факторов четыре: свет, тепло, влага и минеральное питание.

Свет и тепло — факторы «космического происхождения», они не подвергаются существенным изменениям под влиянием деятельности человека. В широком диапазоне их можно менять только в закрытом грунте (теплицах, парниках, камерах искусственного климата).

Влага и минеральное питание — факторы земного происхождения. Изменяя их количество в почве, проводя осушительные или оросительные мелиорации, человек влияет на урожай сельскохозяйственных культур. В агрометеорологии обычно ограничиваются рассмотрением влияния на растения света, тепла и влаги.

Некоторые метеорологические, гидрологические и почвенные элементы, такие, как влажность воздуха, скорость ветра, снежный покров, облачность, дымка, туман, структура почвы, ее механический состав, глубина промерзания, оказывают косвенное влияние на растения, изменяя подток тепла и влаги к растению, и ослабляют или усиливают действие света, тепла и влаги.

Факторы жизни и косвенные факторы действуют на растения одновременно, поэтому установить влияние конкретного метеоро-

логического элемента и 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 их развитие (формирование органов, образование 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 их удовлетворяются полностью. Питание растений — сложный процесс. Оно включает усвоение из почвы минеральных солей, из воздуха — азота, который высшие растения получают через низших организмов, и углекислого газа ( $CO_2$ ), усваиваемого при фотосинтезе (ассимиляции). В процессе фотосинтеза образуются органические вещества, составляющие 90—95% сухой массы 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 следующие минеральные вещества, кг:

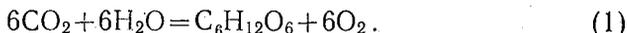
Азот . . . . .	1—2	Другие элементы . . . . .	2—4
Фосфор . . . . .	0,1—0,5	Всего . . . . .	5—10,5
Калий . . . . .	2—4		

В то же время 1 га поля, занятого зерновыми культурами, 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 очевидно ведущая роль фотосинтеза в питании растений. Однако значение азотного, фосфорного, калийного и других видов питания также велико, поскольку они дополняют, а не заменяют и не исключают один другого. 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 большее количество солнечной энергии. Одновременно растения выделяют кислород ( $\text{O}_2$ ). Реакцию усвоения углекислого газа растениями упрощенно можно представить в виде уравнения



Растениям свойственен и другой процесс — диссимиляция (дыхание), противоположный 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 (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. Следовательно, выделение  $\text{O}_2$  в процессе ассимиляции превышает его поглощение при диссимиляции. В связи с этим возникла гипотеза о биогенном происхождении кислорода воздуха, что находит достаточное подтверждение.

Интенсивность фотосинтетической деятельности растений можно оценивать тремя способами:

- 1) по газообмену с окружающей средой, т. е. количеству усвоенного  $\text{CO}_2$ ;
- 2) по количеству образовавшейся биомассы;
- 3) по количеству усвоенной в процессе фотосинтеза энергии, характеризующейся калорийностью.

Чтобы оценить количество лучистой энергии, использованной растениями для создания урожая, определяется калорийность путем сжигания сухого вещества урожая в калориметрах.

Произведение калорийности вещества ( $k$ ) на урожай с единицы площади ( $Y$ ) характеризует запасы потенциальной энергии в урожае ( $Q_{\text{пот}} = kY$ ). Отношение этой энергии с единицы площади к суммарной радиации, полученной той же площадью  $(S' + D)_{\text{полг}}$ , выраженное в процентах, называется коэффициентом использования солнечной энергии ( $\eta$ ).

$$\eta = \frac{Q_{\text{пот}}}{(S' + D)_{\text{полг}}} 100\%. \quad (2)$$

Оказалось, что на фотосинтез расходуется только часть (около 1—4%) поглощенной солнечной энергии. Большая часть ее идет преимущественно на испарение и теплообмен растений с воздухом и почвой. Наибольшее значение коэффициента  $\eta$  — у масличных культур (лен — 4%), наименьшее — у овощных (свекла — 2, картофель — 3%). С ростом урожая культуры  $\eta$  обычно растет.

Для выяснения причин низких значений коэффициента  $\eta$  рассмотрим факторы, влияющие на интенсивность фотосинтеза растений.

Интенсивность фотосинтеза и других физиологических процессов в растениях зависит от физических особенностей и характера лучистого потока, а именно: 1) спектрального состава лучистого потока; 2) 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 несколько меньше 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 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 наблюдается у молодых растений. Указанные закономерности были выявлены Е. Л. Криновым как для культурных, так и для дикорастущих растений, в том числе для лесных насаждений. Однако Н. Н. Калитин и Е. А. Лопухин установили, что максимум альbedo для лесных участков часто наблюдается не в желто-зеленой части спектра, а в красной.

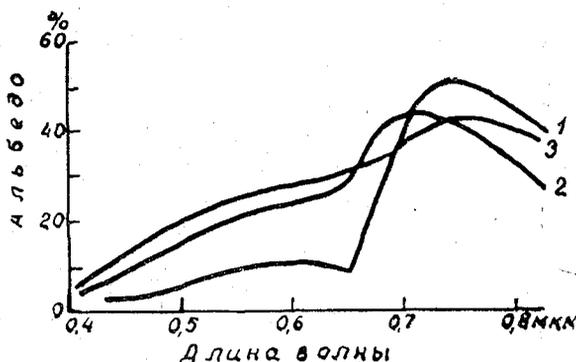


Рис. 1. Спектральное альbedo (А) поля ячменя (Карадаг, безоблачное небо):  
1—ячмень зеленый; 2—ячмень желтый; 3—стерня ячменя

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 радиацией.

В последнее десятилетие в СССР широкое развитие получили работы по исследованию влияния на растения всего диапазона фотосинтетически активной радиации (ФАР), т. е. радиации с длиной волны 0,380—0,710 мкм. С точки зрения биофизики, как рекомендует Ю. К. Росс, целесообразно разделить спектр солнечной радиации на четыре области, отличающиеся друг от друга эффектами воздействия на растения (табл. 1).

Как видно из табл. 1, доля ФАР в общем потоке солнечной радиации заметно меняется. Расчетным и экспериментальным способами Х. Г. Тооминг, Б. И. Гуляев определили количественные коэффициенты перехода от общего потока коротковолновой солнечной

радиации к ФАР. Оказалось, что эти коэффициенты зависят от высоты солнца, степени прозрачности атмосферы и облачности. На рис. 2 изображена зависимость коэффициента перехода от суммы прямой солнечной радиации ( $\Sigma S'$ ), приходящей на горизонтальную поверхность, к сумме ФАР за тот же период ( $\Sigma S_{\phi}$ ). При высоте солнца более  $30^\circ$  переходный коэффициент ( $C_s$ ) изменяется

Таблица 1

Части солнечного спектра и эффект их воздействия на растения

Вид радиации	Длина волны, мкм	Доля радиации, %	Эффект действия на растение		
			тепловой	фотосинтез	рост и развитие
Ультрафиолетовая	0,280—0,380	0—4	Несущественный	Несущественный	Существенный
Фотосинтетически активная	0,380—0,710	21—46	Существенный	Существенный	"
Близкая инфракрасная	0,710—4,000	50—79	"	"	"
Инфракрасная	4,000—100,000	—	"	"	Несущественный

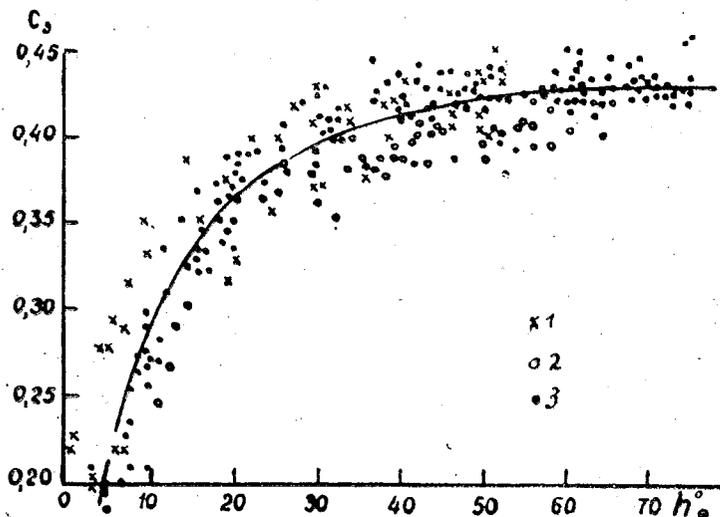


Рис. 2. Зависимость переходных коэффициентов ФАР ( $C_s$ ) для прямой радиации от высоты солнца ( $h_{\odot}^\circ$ ) в ряде районов:

1—Йыгева; 2—Молдавия; 3—Гиссарская долина

незначительно и составляет в среднем около 0,43. Установлено, что приведенная на рис. 2 зависимость мало меняется в географическом разрезе, т. е. носит универсальный характер. Переходный коэффициент от сумм рассеянной радиации к суммам ФАР ( $C_D$ ) также зависит от высоты солнца (рис. 3) и колеблется в пределах 0,55—0,80. На основании обобщения зависимостей, показанных на рис. 2 и 3, и теоретических расчетов тартуские актинометристы приняли следующие средние значения переходных коэффициентов:  $C_S=0,43$  и  $C_D=0,57$ . Они рассчитаны с точностью  $\pm 3\%$ . Таким образом, интенсивность ФАР ( $Q_\Phi$ ) может быть вычислена по формуле

$$Q_\Phi = 0,43 S' + 0,57 D, \quad (3)$$

где  $S'$  — суммы прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность;  $D$  — суммы рассеянной солнечной радиации.

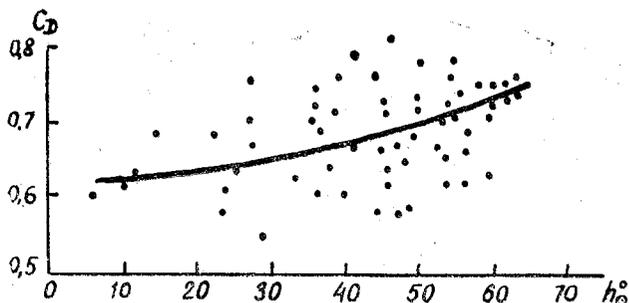


Рис. 3. Зависимость переходных коэффициентов ФАР для рассеянной радиации безоблачного неба ( $C_D$ ) от высоты солнца  $h_\odot$

Следовательно, при фотосинтезе рассеянная радиация используется полнее, чем прямая.

Действие ФАР 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 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 степень их заражения. Известно также влияние ультрафиолетовых лучей с длиной волны 0,290—0,313 мкм на поступление в растение минеральных веществ и образование витамина *D*.

На инфракрасную часть лучистой энергии ( $\lambda > 0,710$  мкм) приходится около половины потока солнечной энергии, однако (см. рис. 1) поглощается она листьями весьма незначительно. Исключения составляют лучи с длиной волны 1,10—2,50 мкм, которые хорошо усваиваются содержащейся в листьях водой.

Достигнув поверхности 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.

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 разграничены не резко, между ними имеются переходные формы, которые способны выносить как длительное затенение, так и интенсивное освещение.

С ростом интенсивности ФАР 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

уравновешивание, носит название компенсационного пункта. У разных растений компенсационный пункт различен. У теневыносливых компенсация наступает при интенсивности суммарной ФАР около 0,01—0,02 кал/см<sup>2</sup>·мин, а у светолюбивых — около 0,02—0,03 кал/см<sup>2</sup>·мин. Дальнейшее повышение интенсивности радиации сопровождается усилением фотосинтеза (рис. 4). Однако при сравнительно невысокой интенсивности солнечной радиации, но при благоприятном температурном и водном режимах наступает так называемое световое насыщение.

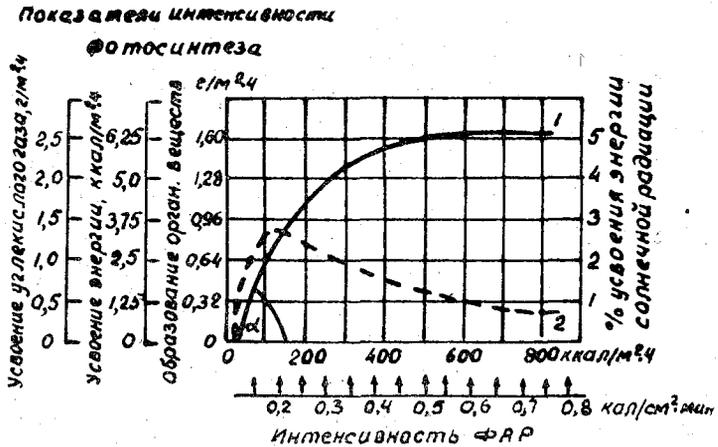


Рис. 4. Световая кривая 1 фотосинтеза и соответствующая ей кривая усвоения энергии 2, в процентах от падающей.

Из простых геометрических соображений следует, что участок световой кривой до светового насыщения может быть описан формулой

$$A = Q_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

где  $A$  — интенсивность фотосинтеза;  $Q_{\phi}$  — интенсивность падающей на растительный покров ФАР;  $\alpha$  — угол наклона световой кривой к оси абсцисс ( $\operatorname{tg} \alpha$  обычно обозначают  $\beta$ ).

Из формулы (4) видно, что при малых значениях ФАР фотосинтез пропорционален интенсивности радиации и слабо зависит от других внешних факторов. При значениях ФАР, соответствующих световому насыщению и выше, фотосинтез, наоборот, мало зависит от прихода радиации и существенно — от концентрации углекислоты, температуры и других внешних факторов. Экспериментальные исследования показали, что в условиях светового насыщения фотосинтез пропорционален концентрации углекислоты. Следовательно, можно считать, что при

$$Q_{\phi} \rightarrow \infty \quad A = \tau \cdot c, \quad (5)$$

где  $\tau$  — коэффициент пропорциональности, являющийся функцией температуры и других внешних факторов, но не зависящий от концентрации  $\text{CO}_2$  ( $\tau$  соответствует высоте световой кривой в момент светового насыщения при данной концентрации углекислоты);  $c$  — концентрация  $\text{CO}_2$ .

По данным М. И. Будыко, в общем виде световую кривую фотосинтеза можно описать гиперболической формулой

$$A = \frac{\beta Q_{\Phi}}{1 + \frac{\beta Q_{\Phi}}{\tau \cdot c}}, \quad (6)$$

где  $A$  — интенсивность фотосинтеза единицей поверхности листа в единицу времени ( $\text{г}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ ).

У светолюбивых растений световое насыщение наблюдается при интенсивности ФАР около  $0,5$ — $0,6$   $\text{кал}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ , а у теневыносливых — примерно при  $0,1$ — $0,3$   $\text{кал}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ . 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. С уменьшением интенсивности радиации (см. кривая 2 рис. 4) увеличивается процент использования ее энергии на фотосинтез, а это еще раз подтверждает, что растения лучше используют рассеяную радиацию.

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. В связи с этим суточный ход фотосинтеза в облачные и безоблачные дни различен (рис. 5). В безоблачный день в полуденные и послеполуденные часы, когда интенсивность суммарной солнечной радиации велика и значительно превышает световое насыщение, интенсивность фотосинтеза резко уменьшается. В отдельные моменты расход вещества на диссимиляцию может превышать образование его в процессе ассимиляции и в итоге фотосинтез становится отрицательным. При облачном небе, 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  $10$ — $12$  часам. Затем нередко на-

блюдается 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.

В современной биофизике намечены следующие пути возможного повышения коэффициента полезного действия фотосинтезирующих систем:

1. Полив дождеванием, что приводит к лучшему влагообеспечению растений.

2. Дымление или распыление аэрозолей, способствующих уменьшению прозрачности атмосферы и ослаблению суммарной радиации.

3. Специальное формирование крон, в результате которого в полуденные часы уменьшается поглощенная растениями радиация.

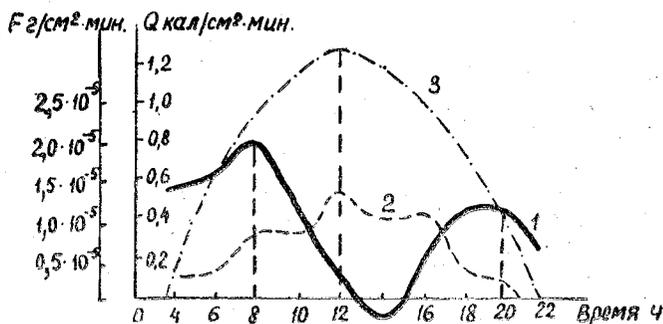


Рис. 5. Суточный ход интенсивности фотосинтеза ( $F$ ) в ясный и пасмурный день:

1—безоблачный день; 2—пасмурный день; 3—суммарная солнечная радиация ( $Q$ ) в безоблачный день

### Математическое моделирование фотосинтеза растительного покрова

Вопрос повышения урожайности сельскохозяйственных культур неразрывно связан с повышением интенсивности фотосинтеза. До последнего времени изучение проблемы продуктивности растительного покрова носило эмпирический характер. На основе обширного экспериментального материала устанавливались связи между урожаями сельскохозяйственных культур и условиями среды (осадками, температурой воздуха, влажностью почвы и др.) В расчетные формулы при этом интенсивность фотосинтеза не включалась. В последнее десятилетие появились работы другого направления — математическое моделирование фотосинтеза. В СССР разработано несколько схем фотосинтеза растительного покрова (схема Ю. К. Росса, З. К. Бихеле, М. И. Будыко и Л. С. Гандина,

получившая дальнейшее развитие в трудах Н. А. Ефимовой, и др.). Различия схем связаны с неодинаковой детализацией используемых численных моделей, из которых одни имеют более общий, другие более частный характер.

Теория фотосинтеза растительного покрова М. И. Будыко и Л. С. Гандина базируется на следующих положениях.

В слое растительного покрова на разных его уровнях интенсивность фотосинтеза различна, что связано с особенностями распределения ФАР, концентрации  $\text{CO}_2$ , температуры воздуха. Высота этого слоя значительно меняется в течение вегетационного периода, причем для разных типов растительных сообществ толщина слоя может составлять как несколько сантиметров, так и несколько десятков метров (лесная растительность).

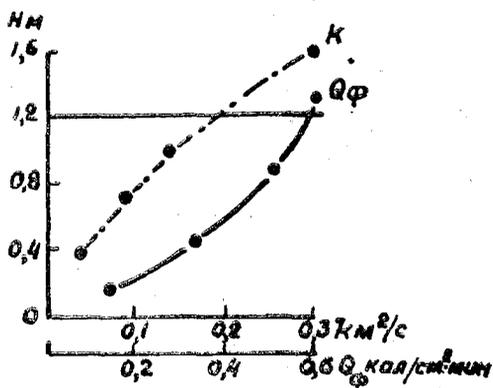


Рис. 6. Значения коэффициента турбулентного обмена  $k$  и фотосинтетически активной радиации  $Q_{\text{ф}}$  в слое растительного покрова  $H$ .

При изучении процессов в слое растительного покрова последний считают достаточно однородным по горизонтали, что позволяет осреднить метеорологические элементы на конкретных горизонтальных уровнях. Растительный покров существенно влияет на вертикальное распределение различных метеорологических элементов. Например, внутри его интенсивность коротковолновой радиации заметно (иногда в 10 раз) уменьшается с приближением к поверхности почвы в результате поглощения и рассеяния ее вышележащими органами растений. Это видно из рис. 6, полученного по экспериментальным материалам Н. А. Ефимовой. Изменение ФАР с высотой в растительном покрове при прохождении потоком слоя  $dz$  определяется уравнением

$$dQ_{\text{ф}} = \gamma s Q_{\text{ф}} \cdot dz, \quad (7)$$

где  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от характера растительного покрова, расположения листьев, их формы

и т. д.;  $s$  — удельная поверхность листьев (поверхность листьев в единице объема).

На верхней границе растительного покрова ( $z=H$ ) поток ФАР ( $Q_{\Phi H}$ ) можно измерить с помощью стандартных актинометрических приборов. Для определения изменения ФАР в слое от некоторого уровня  $z$  до верхней границы растительного покрова  $H$  проинтегрируем уравнение (7)

$$\int_{Q_{\Phi}}^{Q_{\Phi H}} \frac{dQ_{\Phi}}{Q_{\Phi}} = \int_z^H \gamma s dz; \quad (8)$$

$$\ln \frac{Q_{\Phi H}}{Q_{\Phi}} = \gamma \int_z^H s dz; \quad (9)$$

Из уравнения (9) легко получить следующее выражение:

$$Q_{\Phi} = Q_{\Phi H} e^{-\gamma \int_z^H s dz}. \quad (10)$$

Под знаком интеграла в уравнении (10) стоят две переменные величины, поэтому аналитическим путем интеграл не решается, а используются численные методы.

В отличие от приземного слоя вне растительного покрова внутри него потоки водяного пара, тепла, количество движения не остаются постоянными по высоте. Например, поток водяного пара в растительном покрове возрастает с высотой, так как особенно интенсивно испаряют листья верхней трети его слоя. В этом слое существенные изменения по вертикали свойственны и потоку углекислоты ( $C$ ). Используя закономерности теории турбулентной диффузии, по аналогии с потоком тепла и влаги поток углекислого газа на уровне  $z$  может быть записан так:

$$C_z = \rho k \frac{dc}{dz}, \quad (11)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха;  $k$  — коэффициент турбулентности;  $\frac{dc}{dz}$  — изменение концентрации  $CO_2$  с высотой.

Известно, что углекислота, усваиваемая растениями, поступает в слой растительного покрова в основном из воздуха и частично из почвы. Изменение же потока  $C_z$  в нем определяется процессами ассимиляции (поглощение  $CO_2$ ) и диссимиляции (выделение  $CO_2$ ). Следовательно, общее изменение вертикального потока  $CO_2$  ( $dC_z$ ) определяется соотношением

$$dC_z = dA_1 + dA_2, \quad (12)$$

где  $dA_1$  — усвоение  $\text{CO}_2$  в процессе ассимиляции в слое  $dz$ ;  $dA_2$  — выделение  $\text{CO}_2$  в процессе диссимиляции в слое  $dz$ .

При разработке теории фотосинтеза в слое растительного покрова необходимо установить количественную связь ассимиляции  $\text{CO}_2$  единицей поверхности листа с влияющими на нее внешними факторами. Эта связь характеризуется световой кривой. Чтобы оценить фотосинтез в слое растительного покрова толщиной  $dz$  при средней удельной поверхности листьев  $s$ , будем считать, что этот покров достаточно однороден по горизонтали. Тогда интенсивность ассимиляции в слое  $dz$ , как следует из уравнения (6), можно оценить следующим образом:

$$dA_1 = \frac{\beta Q_{\Phi} s dz}{1 + \frac{\beta Q_{\Phi}}{\tau c}} \quad (13)$$

Учитывая закономерность изменения ФАР с высотой, описываемую уравнением (10), получаем

$$dA_1 = \frac{\beta Q_{\Phi H} e^{-\gamma \int_z^H s dz}}{1 + \frac{\beta \cdot Q_{\Phi H}}{\tau c} e^{-\gamma \int_z^H s dz}} \cdot s dz \quad (14)$$

Одновременно с ассимиляцией наблюдается и процесс диссимиляции, который может быть описан уравнением

$$dA_2 = -\varepsilon s dz, \quad (15)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от температуры растительного покрова и характеризующий интенсивность дыхания на единице площади растений.

В результате этих двух процессов в зависимости от их интенсивности меняется с высотой концентрация  $\text{CO}_2$ .

Следовательно, учитывая уравнения (12), (14), (15), получаем нелинейное дифференциальное уравнение, которое решается численно, но в отдельных случаях может иметь аналитическое решение:

$$\frac{d}{dz} \left( \rho k \frac{dc}{dz} \right) = \frac{\beta s Q_{\Phi H} e^{-\gamma \int_z^H s dz}}{1 + \frac{\beta Q_{\Phi H}}{\tau c} e^{-\gamma \int_z^H s dz}} - \varepsilon s. \quad (16)$$

Алгоритм численного решения уравнения (16) и его реализация выполнены Л. С. Гандиным, Г. В. Менжулиным, В. Б. Усовым. Для решения уравнения (16) используют следующие условия:

$$\left( \rho k \frac{dc}{dz} \right) \Big|_{z=0} = -c_0, \quad (17)$$

т. е. у земли изменение концентрации  $\text{CO}_2$  равно потоку углекислоты из почвы.

$$\left( \rho k \frac{dc}{dz} \right) \Big|_{z=H} = \rho D_H (c_\infty - c_H), \quad (18)$$

где  $c_\infty$  — концентрация углекислоты в воздухе на высоте, где она мало зависит от свойств растительного покрова;  $c_H$  — концентрация углекислоты на верхней границе растительного покрова  $H$ ;  $D_H$  — интегральный коэффициент турбулентной диффузии в слое воздуха между  $H$  и  $\infty$ .

Из условия баланса углекислоты в межлистном пространстве для всего слоя растительного покрова найдем

$$A = c_H + c_0 + \int_0^H \epsilon s dz, \quad (19)$$

где  $A$  — суммарная величина ассимиляции;  $\int_0^H \epsilon s dz$  — выделение  $\text{CO}_2$  в процессе дыхания всем слоем растительного покрова.

Найдя из решения уравнения (16)  $c_H$ , можно определить суммарную величину ассимиляции, характеризующую продуктивность растительного покрова ( $\Pi$ ).

В результате расчетов установлено, что продуктивность растительного покрова, равная разности суммарной ассимиляции и расхода органического вещества на дыхание, существенно зависит как от параметров, характеризующих свойства самого покрова (например,  $\sigma\gamma$ ), так и от многих метеорологических факторов. При достаточном увлажнении наиболее существенное влияние оказывают два фактора — ФАР и температура растительного покрова, влияющая на величины параметров  $\tau$  и  $\epsilon$ .

Зависимость продуктивности растительного покрова от ФАР и температуры показана на рис. 7, откуда видно, что влияние радиации и температуры на его продуктивность является комплексным. При этом ФАР в реально существующих условиях всегда является фактором, находящимся в «минимуме», что связано с постоянным недостатком радиации для нижних, частично или полностью затененных листьев. Влияние температуры на продуктивность сложно, так как подъем ее выше определенного предела существенно снижает продуктивность. Изменение возможной продуктивности растительного покрова на ЕТС показано на рис. 8. Значения  $\Pi$ , приведенные на карте, характеризуют массу усвоенной

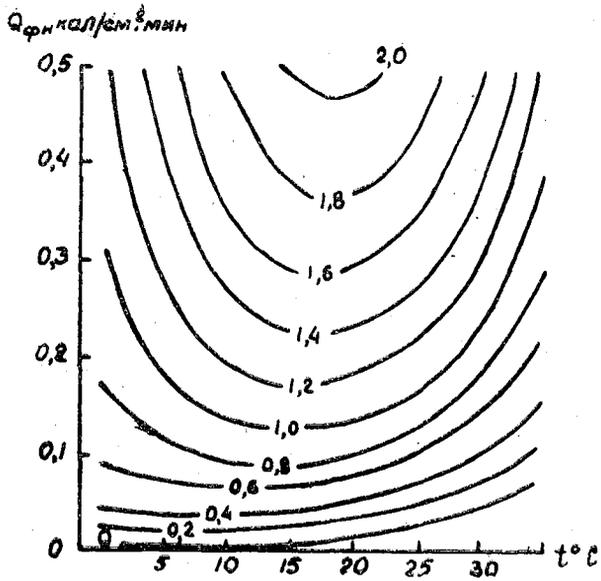


Рис. 7. Зависимость продуктивности растительного покрова в относительных единицах от ФАР  $Q_{\text{ФН}}$  и температуры воздуха

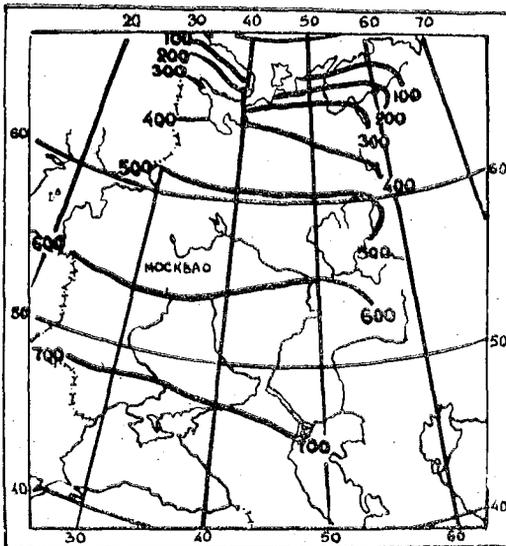


Рис. 8. Возможная продуктивность растительного покрова на ЕТС, г/га.

углекислоты на единицу площади (ц/га) при оптимальных условиях увлажнения и высокой агротехнике. Указанные цифры значительно превосходят количество углекислоты, усвоенной растениями при рекордных урожаях, что говорит о больших возможностях повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Для этого следует не только улучшать почвенные, метеорологические и агротехнические условия, но по мере возможности менять конструкцию растения, улучшать активность ее фотосинтезирующих органов.

### Влияние продолжительности освещения на развитие растений

Ряд ученых, а ранее других К. А. Тимирязев, установили, что реакция различных видов растений на продолжительность солнечного освещения неодинакова. В зависимости от географического расположения своей родины растения приспособились к определенному соотношению дня и ночи. Реакция растений на соотношение продолжительности дня и ночи называется фотопериодизмом. Одни растения быстро растут и развиваются при продолжительном (16—17 ч) дне. С увеличением дня или при непрерывном освещении развитие таких растений ускоряется, отчего сокращается вегетационный период. Это растения длинного дня. К ним относятся пшеница, ячмень, рожь, овес, горох, 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 по мере продвижения яровой пшеницы к северу в северном полушарии резко уменьшается продолжительность периода от прорастания до колошения. При этом соответственно уменьшается и количество получаемого растением тепла.

Другие растения, например культуры южного происхождения, быстрее развиваются при коротком (12—14 ч) дне и продолжительной ночи. Это растения короткого дня. Темпы их развития при длинном дне или непрерывном освещении очень замедляются, и в ряде случаев такие растения могут не прийти к плодоношению. Необходимые для процесса их развития преобразования содержимого клеток происходят в основном в темную часть суток, следовательно, эти культуры труднее продвигать в высокие широты.

Различные сорта одного вида растений неодинаково относятся к продолжительности дня. Например, подсолнечник — растение короткого дня, но есть сорта, развитие которых ускоряется при длинном дне, что и определяет чрезвычайно широкое распространение подсолнечника по территории СССР, вплоть до 50° с. ш.

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 свето-

культурой растений. При наличии светокультуры можно получать урожай овощей в зимние месяцы. В связи с тем, что лампы накаливания дают в основном инфракрасную радиацию, в качестве дополнительного источника синего и фиолетового света (имеющегося в минимальных количествах в спектре ламп накаливания) используются ртутные лампы, 40% энергии излучения которых падает на длины волн 0,405 — 0,436 мкм. В последнее время в светокультуре растений широкое распространение получили флюоресцентные и люминесцентные лампы, спектр света которых ближе к дневному.

## § 2. РОЛЬ ТЕПЛА В ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ

Тепловой режим растений складывается под влиянием радиационного баланса, теплообмена с воздухом и почвой, затрат тепла на испарение влаги. В результате этих процессов изменяется температура растений. Влияние каждого из этих факторов в отдельности на температуру растений установить чрезвычайно трудно. Кроме того, степень нагревания растений зависит от многих других условий, а именно: формы листьев и их ориентации относительно солнца, альbedo растений, экспозиции склонов. К тому же на температуру растений влияют почвенные условия, в частности степень увлажнения почвы.

В настоящее время выполнены отдельные измерения температуры листьев различных культур. Для этого используются термоэлектрические термометры, датчики которых имеют вид тонких сеток или «пауков». Все более широкое применение получают радиационные термометры, которыми измеряют поток длинноволновой радиации, идущий от листьев, и по нему определяют среднюю температуру слоя растительного покрова.

Однако полученный материал еще недостаточен для обобщений. Поэтому зачастую для оценки термического режима растений используют температуру воздуха среди растений или в психрометрической будке. Естественно, что при этом допускается ошибка, величина которой зависит от времени суток и степени увлажнения почвы. На рис. 9 приведен дневной ход разности температуры растительного покрова ( $T_w$ ) и температуры

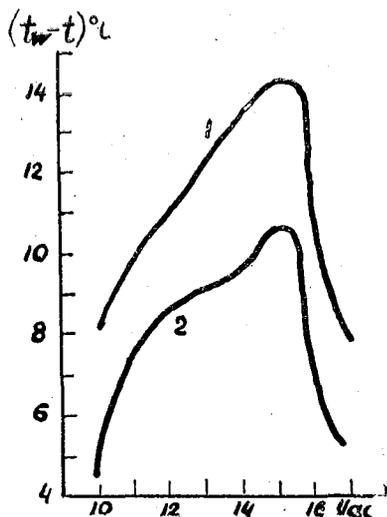


Рис. 9. Суточный ход разности температуры ( $T_w - T$ )°C растительного покрова и воздуха в Колтушах.

Температура растений измерена:  
1 — радиационным термометром;  
2 — термопауком

воздуха ( $\bar{T}$ ) в Колтушах, в зоне избыточного увлажнения. В отдельные часы она может достигать  $10^\circ$  и более. В сухих районах эта разность может быть еще больше. Следовательно, температура воздуха очень приближенно характеризует термический режим растительного покрова. Поэтому температуру растений часто определяют расчетным путем по уравнению теплового баланса деятельного слоя. Для суши используют уравнение

$$R = LE + P + B, \quad (20)$$

где  $R$  — радиационный баланс деятельного слоя;  $L$  — скрытая теплота испарения;  $E$  — испарение;  $P$  — турбулентный поток тепла;  $B$  — поток тепла в почву.

Это уравнение может быть преобразовано

$$R_0 - 4\delta\sigma T^3(T_w - T) = LE + \rho c_p D(T_w - T) + B. \quad (21)$$

где  $R_0$  — радиационный баланс земной поверхности, вычисленный при определении эффективного излучения по температуре воздуха;  $\delta$  — коэффициент, характеризующий свойства излучающей поверхности;  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана;  $T$  — температура воздуха;  $T_w$  — температура деятельной поверхности, в данном случае растительного покрова;  $c_p$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $D$  — интегральный коэффициент диффузии;  $\rho$  — плотность воздуха.

Следовательно,

$$R_0 = LE + B + (T_w - T)(\rho c_p D + 4\delta\sigma T^3) \quad (22)$$

или

$$T_w - T = \frac{R_0 - LE - B}{\rho c_p D + 4\delta\sigma T^3}. \quad (23)$$

Входящие в формулу (23) величины  $R_0$ ,  $LE$ ,  $B$ ,  $D$  рассчитываются по данным стандартных метеорологических измерений. Методы их расчета широко известны в отечественной литературе.  $T$  — температура воздуха в будке. Значение коэффициента  $D$  часто считается постоянным: среднее для дневных условий летом на нерошенных полях — около  $1$  см/с, для средних суточных условий летом — около  $0,6$  см/с.

В условиях избыточного увлажнения местности или на орошенных полях температуру деятельной поверхности (растительного покрова) можно вычислять из уравнения теплового баланса, полагая

$$E = \rho D(q_w - q), \quad (24)$$

где  $q_w$  — удельная влажность воздуха, содержащего насыщенный пар при температуре деятельной поверхности;  $q$  — удельная влажность воздуха.

Принимая во внимание зависимость  $q_w$  от  $T_w$ , можно определить  $T_w$ . При наличии сомкнутого растительного покрова листья растений обычно составляют основную часть деятельной поверхности, на которой осуществляется тепло- и влагообмен с атмосферой. В таком случае можно считать, что средняя температура листьев растений приблизительно равна температуре земной поверхности. При этом, естественно, поверхность как суши, так и растительного покрова считается достаточно однородной и неограниченной.

### **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. Степень и продолжительность ее воздействия определяют процесс ассимиляции.

Рост растений, проявляющийся в накоплении органической массы, является результатом двух противоположных процессов — ассимиляции и диссимиляции. Влияние температуры на них различно. Однако для того и другого процесса общим является наличие точек минимума, оптимума и максимума температуры, соответствующих разной интенсивности процесса. При температуре ниже точки минимума процессы ассимиляции и диссимиляции приостанавливаются вследствие 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 увеличивалась с  $5^\circ$  до  $15^\circ$ , то количество продукта, образовавшегося в результате химической реакции, возрастает вдвое или втрое. Естественно, при повышении температуры протоплазма клеток растений становится более проницаемой для углекислого газа, что приводит к усилению ассимиляции.

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. 10, ассимиляция в интервале от  $0$  до  $30\text{--}35^\circ\text{C}$  с повышением температуры от точки минимума растет в среднем по правилу Вант—Гоффа. При температуре  $25\text{--}30^\circ\text{C}$  процесс ассимиляции стано-

вится наиболее интенсивным, и эту температуру можно определить как точку оптимума. Затем с ее ростом интенсивность ассимиляции падает, а при 45—50° С 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 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.

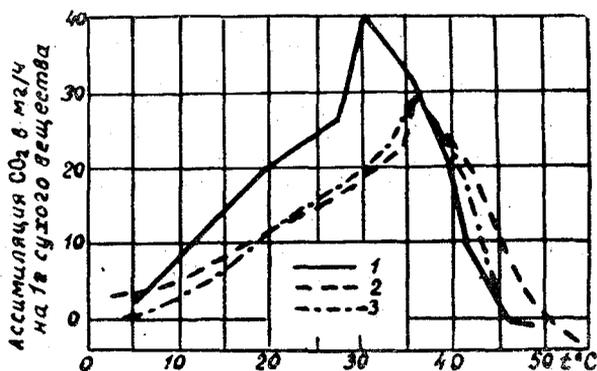


Рис. 10. Зависимость фотосинтеза от температуры листьев при оптимальном снабжении  $\text{CO}_2$ :  
1, 2, 3—листья картофеля, огурцов, томатов, соответственно

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 оптимума. Точка минимума наблюдается при температуре — 10° С, а у зимующих растений — (20—25)° С. Точка оптимума у большинства растений находится в пределах 36—40° С, точка максимума — выше 50° С.

От взаимодействия процессов фотосинтеза и дыхания зависит прирост органической массы растений. Поскольку оба процесса 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. 11). 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.

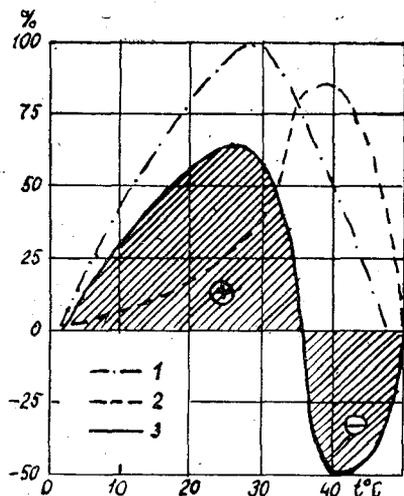


Рис. 11. Зависимость интенсивности ассимиляции (1), диссимляции (2) и результирующего образования биомассы (3) от температуры воздуха (в процентах от максимальной интенсивности фотосинтеза). Знаком (+) обозначено преобладание ассимиляции над диссимляцией, знаком (-) преобладание диссимляции над ассимиляцией.

В течение суток температура растений существенно меняется, что определяет изменение интенсивности процессов ассимиляции и диссимляции, а следовательно, и энергии роста. Максимальная энергия роста наблюдается днем при высокой температуре воздуха, ночью она минимальна и даже может быть отрицательной, что является следствием наличия диссимляции 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 происходит 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 ее развития (табл. 2).

Исследования, проведенные в ГМЦ 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°С.

Таблица 2

Биологический минимум температуры растений полевой культуры  
в разные периоды вегетации, °С

Культура	Появление всходов и формирование вегетативных органов	Формирование органов плодоношения	Культура	Появление всходов и формирование вегетативных органов	Формирование органов плодоношения
Пшеница яровая	4—5	10—12	Горох	4—5	8—10
Просо	10—11	12—15	Соя	10—11	15—18
Кукуруза	10—13	12—15	Фасоль	12—13	15—18
Рис	14—15	18—20	Подсолнечник	7—8	12—15
Гречиха	7—8	10—12	Хлопчатник	14—15	15—20
Овес	4—5	10—12	Конопля	2—3	10—12

Как видно из табл. 2, холодостойкие культуры начинают интенсивное развитие при более низких температурах, чем теплолюбивые, биологический минимум которых сформировался 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 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. Дмитренко установил, что озимая пшеница вегетирует при средней положительной температуре 2,9°С и ниже.

Если температура стала ниже биологического минимума, то приостанавливается процесс развития и роста, но это не вызывает гибели растений. Однако при высокой влажности почвы и температурах ниже биологического минимума семена могут загнивать.

Скорость прохождения всего цикла вегетации или отдельных межфазных периодов в большой мере определяется температурным режимом растения. 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 определенную сумму положительных среднесуточных температур (за период с  $t > 0^\circ$ ) или сумму активных (за период с  $t > 10^\circ \text{C}$ ). В некоторых случаях рассчитывают сумму эффективных температур, т. е. сумму разностей между среднесуточной температурой и биологическим минимумом. Метод суммирования температур основан на предпосылке о физиологической равноценности каждого градуса. Предполагается, что эффект действия температуры на биологические процессы возрастает пропорционально ее росту до некоторых значений.

Суммы положительных среднесуточных или активных температур за межфазный период определяются двумя способами: 1) суммированием среднесуточных температур от момента наступления до окончания межфазного периода; 2) умножением продолжительности периода на среднюю за этот период температуру воздуха. При вычислении суммы активных температур предполагается, что в течение всего межфазного периода среднесуточная температура воздуха выше  $10^\circ \text{C}$ . Следовательно, сумма температур может быть представлена так:

$$\Sigma t = \bar{t} \cdot n, \quad (25)$$

где  $\bar{t}$  — среднесуточная температура воздуха за данный период;  $n$  — число дней в периоде;  $\Sigma t$  — сумма температур за межфазный период.

Сумма активных температур может быть определена как из ежедневных наблюдений, так и по многолетним данным. Подсчет сумм ведется начиная с даты периода среднесуточной температуры воздуха через  $10^\circ \text{C}$ . При этом, если она равна  $10,1^\circ \text{C}$ , то в сумму активных температур включается  $10,1$ , а температура ниже  $10^\circ \text{C}$  в расчет не принимается. 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  $10^\circ \text{C}$ , суммируют температуры воздуха за период между этими датами. Вычисленные таким образом суммы активных температур, необходимые для созревания, оказываются различными для разных сельскохозяйственных культур:

	$\Sigma t^\circ \text{C}$
Лен на волокно . . . . .	1100
Томаты (Бизон) . . . . .	1150
Огурцы (Муромские) . . . . .	1500

Картофель (ранние сорта) . . . . .	1200
Яровая пшеница (Лютесценс) . . . . .	1300
Кукуруза (поздние сорта) . . . . .	2500—3000
Озимая пшеница . . . . .	1400—1500
Подсолнечник . . . . .	1800—2300

Метод активных температур широко использовался в агроклиматических исследованиях советских ученых Г. Т. Селянинова, С. А. Сапожниковой, Ф. Ф. Давитая, А. И. Руденко, Е. С. Улановой.

В основу метода эффективных температур положена предположка о существовании прямолинейной связи между суммой 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. Эффективная температура при этом рассчитывается по формуле

$$t_{эф} = (t - t_0), \quad (26)$$

где  $t$  — средняя за период среднесуточная температура;  $t_0$  — биологический минимум температуры.

Сумма эффективных температур за определенный период может быть вычислена по формуле

$$\Sigma t_{эф} = (t - t_0)n, \quad (27)$$

где  $n$  — число дней в периоде.

Поскольку биологический минимум температуры меняется в течение вегетационного периода, то суммы эффективных температур вычисляют обычно по межфазным периодам (табл. 3).

Таблица 3

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

Культура	Период	
	Выход в трубку — колошение (выметывание)	Колошение (выметывание) — восковая спелость
Пшеница (Лютесценс-062)	330	490
Овес (Победа)	378	428
Ячмень (Кубанец)	330	388

При нормальных сроках сева суммы эффективных температур для каждой культуры почти постоянны. Это позволяет, используя уравнение (27), по прогнозируемой температуре находить продолжительность межфазного периода, а именно:

$$n = \frac{\sum t_{\text{эф}}}{t - t_0}. \quad (28)$$

Уравнение (28) является основным в фенологических прогнозах. При подсчете сумм температур в них включаются и максимальные, которые, увеличивая общую сумму, не ускоряют темпа развития растений. Эти температуры называют балластными. Вопрос о способах учета последних еще не изучен.

### Суточный ход температуры воздуха и термопериодизм растений

Суточный ход температуры воздуха оказывает существенное влияние на рост и развитие растений. Большая амплитуда его 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 этого 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. Это явление называется термопериодизмом. По данным А. А. Малышева, у растений длинного дня процессы развития протекают в основном в дневные часы, у растений короткого дня — в темноте, поэтому у первых темпы развития ускоряются при повышенной дневной температуре воздуха, а у последних — при повышенной температуре ночью.

Детальное исследование амплитуды суточного хода температуры воздуха на территории Советского Союза проведено З. А. Мищенко. По экспериментальным материалам можно установить оптимальные температуры воздуха отдельно для ночных и дневных часов. В табл. 4 приведены такие температуры, полученные в оранжерейных условиях. Можно предполагать, что в полевых условиях оптимальные температуры дня и ночи будут несколько иными.

Следствием термопериодизма является и изменение химического состава растений. Согласно многочисленным исследованиям, существует прямая связь между химическим составом растений и континентальностью климата. В условиях континентального климата повышается сахаристость фруктов и корнеплодов. Например, в Средней Азии произрастают наиболее богатые сахаром

плоды: виноград, яблоки, дыни, арбузы и т. д. В условиях морского климата у зерновых культур повышается содержание крахмала и уменьшается содержание белковых веществ. Снижение содержания белка в зернах пшеницы отмечается и в континентальных районах при увеличении запасов продуктивной влаги в почве в период активной вегетации.

По данным К. А. Флексбергера, наименьшее содержание белка в зернах пшеницы наблюдается в Марокко — 5,4%, а наибольшее в США (штат Канзас) — 26,5%.

Таблица 4

Оптимальные средние дневные и ночные температуры  
для различных культур

Культура	Вегетативный период		Репродуктивный период	
	Температура воздуха, °С			
	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	—	—

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 территориальная 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:

$$B = 1,29 a_t + 2,1, \quad (29)$$

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.

Естественно, что в отдельных случаях, при аномальных метеорологических условиях, расчет процентного содержания белка в пшенице может быть отличным от вычисленного по формуле (29). Е. С. Уланова установила, что в загущенных посевах озимой пшеницы, если не приняты специальные меры к увеличению азота в почве, белковость зерна снижается.

### § 3. РОЛЬ ВОДЫ В ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ

#### Понятие о транспирации и влагопотреблении растений

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

Растения получают воду практически только из почвы путем всасывания ее корневыми волосками и корневыми мочками — тончайшими окончаниями корней. Корневые волоски проникают в почвенные капилляры и всасывают влагу. Такое всасывание происходит благодаря тому, что клетки корневых волосков обладают некоторым дефицитом влаги 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 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). Как следует из работ Н. А. Максимова, у культурных растений осмотическое давление составляет 5—12 атм, иногда (например, в корнях свеклы) 20—40 атм, а у дикорастущих — еще выше. Всасывание воды клетками корневого волоска вызывает растяжение клетки. Клеточная оболочка оказывает на содержимое клетки эластичное противодействие (тургорное давление) в направлении, противоположном осмотическому давлению, стремящееся уравновесить его. Поступление воды в клетку будет продолжаться до тех

пор, пока тургорное давление ( $p'$ ) не уравновесит осмотическое давление 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 сосущая сила клетки ( $s$ ) будет равна разности между осмотическим давлением клеточного сока и тургорным напряжением растянутой оболочки:

$$s = p - p'. \quad (30)$$

Для бесперебойного снабжения растений водой необходимо, чтобы сосущая сила была больше сил, связывающих воду с почвенными частицами, что наблюдается 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 она 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 влагой, прекратилось бы ее поступление, 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 см<sup>2</sup> поверхности листа приходится 200—400 устьиц. Вместе с газообменом наблюдается диффузия водяного пара из устьиц в воздух. Частично проникновение пара происходит и через поверхность листа.

Процесс испарения влаги самими растениями называется транспирацией. В отличие от испарения транспирация определяется не только метеорологическими факторами, 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 метеорологические элементы: температура, влажность воздуха, ветер и количество радиации, интенсивность турбулентного обмена. В условиях бесперебойного снабжения растений водой и питательными веществами в процессе транспирации ведущее место принадлежит внешним факторам. В этом случае транспирация растений хорошо коррелируется с рядом метеорологических элементов (дефицитом влажности, ветром) и особенно испаряемостью, что было показано как советскими (Н. А. Максимов), так и зарубежными учеными (Дилман).

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

Исследования академика Н. А. Максимова показали, что суточный ход транспирации определяется влиянием внешних и внутренних факторов. Обычно устьица растений открываются на рассвете, 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 она 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 ее способствует устранению дефицита влаги в клетках растения, и к вечеру устьица вновь открываются. Таким образом, при засушливой погоде появляется второй максимум транспирации, который обычно меньше первого.

Способность растений регулировать расход воды на транспирацию проявляется только при температуре не выше 35—40° С. При более высоких температурах устьица не закрываются, растения быстро теряют влагу и могут погибнуть. Кроме того, процесс транспирации находится в прямой зависимости от их возраста. 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. Растения в процессе своего развития потребляют большое количество воды. Она расходуется на транспирацию, построение растительных тканей, сохранение тургора. Вместе с этим некоторое количество воды испаряется с поверхности почвы. Сумму расхода воды на транспирацию и испарение с поверхности почвы принято называть суммарным испарением. Поскольку большая часть потребляемой растениями воды расходуется на транспирацию, а испарение с почвы при наличии растительного покрова, даже когда влажность почвы высока, невелико, то суммарное испарение при оптимальной влажности почвы близко к влагопотребности. Поэтому обычно под влагопотребностью понимают расход воды сообществом растений на суммарное испарение при оптимальном

увлажненный корнеобитаемого слоя. Она зависит как от метеорологических условий, так и от биологических особенностей самой культуры, возраста растений, уровня агротехники.

В работах А. М. Алпатьева, Р. Э. Давида, А. В. Процорова и других установлена связь между суммарным испарением при оптимальной влажности почвы и испаряемостью в лесной, степной и пустынной зонах (на поливе) СССР. Под испаряемостью понимают максимально возможное испарение с достаточно однородной поверхности при неограниченных запасах влаги в корнеобитаемом слое. Действительно, при достаточной влажности почвы расход воды растениями на транспирацию в основном определяется иссушающей способностью воздуха. Поэтому хотя качественно испарение с увлажненной суши и транспирация — различные процессы, но количественно они лимитируются энергетическими ресурсами района, а значит, близки друг другу. Следовательно, в среднем за вегетационный период суммарное испарение при оптимальной влажности почвы близко к сумме испаряемости за тот же период. Коэффициент корреляции этих величин 0,92—0,98.

Испаряемость зависит от комплекса метеорологических условий, 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 ее зависимости от одного или от нескольких указанных факторов

Можно выделить четыре группы методов определения испаряемости:

- 1) по температуре воздуха;
- 2) по дефициту влажности воздуха;
- 3) по радиационному балансу;
- 4) по комплексу метеорологических или гидрологических элементов, учитываемых тепловым или водным балансами.

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:

$$E_0 = 0,1 \sum t_{>10^{\circ}} , \quad (31)$$

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

По данным Л. П. Серяковой и Г. В. Поповой эмпирический коэффициент в формуле (31) на территории Советского Союза заметно меняется.

Средний многолетний коэффициент в формуле Г. Т. Селянинова

	ЕТС	АТС
Средний . . . . .	0,26	0,28
Минимальный . . . . .	0,19	0,17
Максимальный . . . . .	0,33	0,37

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

$$E_0 = 0,65 \Sigma d, \tag{32}$$

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

В работах последователей А. М. Алпатьева установлено, что эмпирический коэффициент в формуле (32) заметно отличается в разных климатических условиях, уменьшаясь с ростом сухости климата (т. е. с увеличением  $\Sigma d$ ).

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 таких условиях очень мал и при максимальном испарении близок к нулю. В связи с этим формула расчета испаряемости имеет следующий вид:

$$E_0 = \frac{R_0 - B}{L}, \tag{33}$$

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 четвертой группы, 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. Из этой группы следует отметить комплексный метод М. И. Будыко и метод Д. Л. Лайхтмана.

Комплексный метод определения испаряемости основан на использовании уравнения теплового баланса. Как указывает М. И. Будыко, испаряемость, т. е. потенциально возможное испарение с оптимально увлажненной поверхности суши, когда транс-

пирация и испарение с почвы определяются только внешними факторами, можно найти из следующего выражения:

$$E_0 = \rho D (q_s - q), \quad (34)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха;  $D$  — коэффициент турбулентной диффузии;  $q_s$  — удельная влажность воздуха, содержащего насыщенный пар при температуре подстилающей поверхности;  $q$  — удельная влажность воздуха.

Значения  $q_s$  можно определить из уравнения теплового баланса увлажненного участка;

$$R_0 - B = L\rho D (q_s - q) + (4\delta\sigma t^3 + \rho c_p D) (t_s - t), \quad (35)$$

где  $R_0$  — радиационный баланс увлажненной поверхности;  $B$  — поток тепла в почву;  $L$  — скрытая теплота испарения;  $\delta$  — коэффициент, характеризующий свойства излучающей поверхности;  $t$  — температура воздуха;  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана;  $t_s$  — температура испаряющей поверхности;  $c_p$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

В уравнения (34) и (35) входят температура и удельная влажность воздуха над орошенным участком. Поэтому при использовании материалов наблюдений «сухих» станций необходимо учитывать возможное изменение  $t$  и  $q$  (или  $e$ ) при орошении полей. Это изменение в большой мере зависит от размера орошенного участка. Вычисленная с учетом изменения температуры и влажности воздуха при орошении испаряемость оказывается меньшей, чем ее значение, рассчитанное по данным на неорошенной территории. В табл. 5 приведены данные об уменьшении испаряемости под влиянием трансформации воздуха в оазисе, средние для территории республик Средней Азии и Нижнего Поволжья.

Таблица 5

Степень уменьшения испаряемости при разном удалении от границы оазиса (в процентах от испаряемости), определенной без учета изменения температуры и влажности при орошении

Район	Удаление от границы оазиса, м			
	500	1000	3000	10 000
Нижнее Поволжье	6,5	8,0	11,3	13,3
Средняя Азия	9,2	10,7	13,8	15,8

Данные табл. 5 целесообразно использовать в тех случаях, когда расчеты изменения  $t$  и  $q$  по каким-либо причинам невозможны.

Известно, что коэффициент турбулентной диффузии  $\bar{D}$  зависит от скорости ветра и стратификации атмосферы. Поскольку над орошенными участками нередко устанавливается изотермия или инверсия, то влияние стратификации на  $D$  оказывается незначительным. Обобщенная зависимость  $D$  от скорости ветра, полученная по материалам наблюдений над орошаемыми полями, выполненным кафедрой общей метеорологии ЛГМИ, приведена в табл. 6.

Таблица 6

Зависимость коэффициента турбулентной диффузии  $D$  от скорости ветра на высоте 1 м ( $u_1$ ) на орошенных полях

$u_1$ м/с	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$D$ см/с	0,60	0,80	0,91	1,12	1,43	1,78

В климатологических расчетах обычно пренебрегают данной зависимостью и принимают  $D=0,63$  см/с. В этом случае, подставляя численные значения  $L$ ,  $\rho$ ,  $D$ ,  $\sigma$ ,  $c_p$  и переходя от  $q$  к  $e$ , для летних условий можно получить следующие расчетные формулы:

$$E_0 = 1,25(e_s - e); \quad (36)$$

$$R_0 - B = 0,75(e_s - e) + 0,8(t_s - t), \quad (37)$$

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

При анализе материалов о фактическом потреблении воды растениями в условиях оптимального увлажнения почвы, когда оно равно влагопотребности, в целом за вегетационный период отмечается близость к испаряемости. В отдельные же периоды (фазы, декады) наблюдается их различие. Н. А. Максимов, А. М. Алпатьев и другие, изучая это явление, установили наличие определенных ритмов в потреблении воды растениями даже в оптимальных условиях увлажнения. Эта особенность сформировалась под влиянием наследственных признаков, выработанных растениями в течение миллионов лет.

Для большинства сельскохозяйственных культур в начале вегетационного периода влагопотребность мала и возрастает по мере увеличения зеленой массы, достигая максимума у однолетних культур в период наступления бутонизации и цветения, а у многолетних — в период максимального прироста урожая. По данным А. М. Алпатьева, максимальная влагопотребность может превысить испаряемость. А. М. Алпатьев вычислил отношение суммарного испарения при оптимальном увлажнении, определенного

в лабораторных условиях по водному балансу почвы, к испаряемости. Это отношение он назвал биологическим коэффициентом.

В зависимости от способа определения испаряемости, использованного при вычислении биологического коэффициента, значение последнего может заметно отличаться, так как обычно включает ошибки, допускаемые в расчете испаряемости. Например, биологический коэффициент в формуле (32) имеет значения, приведенные в табл. 7.

Таблица 7

Биологический коэффициент в формуле А. М. Алпатыева для северо-запада ЕТС

Месяц	Декада	Культура			
		Озимая рожь	Клевер одноукосный	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	—	—	—	—
Средний		0,56	0,53	0,60	0,61

Биологический коэффициент у влаголюбивых культур значительно больше, чем у умеренно или слабо требовательных к влаге.

Если биологический коэффициент вычислить как отношение  $\frac{E}{E_0}$ ,

где  $E$  — расход воды на суммарное испарение, определенный по уравнению водного баланса корнеобитаемого слоя при оптимальной влажности почвы и глубоком залегании грунтовых вод, а  $E_0$  — испаряемость, вычисленная комплексным методом с учетом влияющих на нее основных факторов, то он будет отличаться от биологического коэффициента в формуле А. М. Алпатыева (табл. 7, 8).

Таблица 8

Биологические коэффициенты для зерновых культур  
( $E_0$  определено по комплексному методу)

Культура	Межфазный период	Биологический коэффициент
Яровая пшеница	Посев — всходы	0,81
	Всходы — 3-й лист	0,82
	3-й лист — кущение	0,83
	Кущение — выход в трубку	0,90
	Выход в трубку — колошение	0,99
	Колошение — цветение	0,99
	Цветение — молочная спелость	0,89
	Молочная спелость — восковая спелость	0,85
	Восковая спелость — полная спелость	0,78
Озимая рожь	Посев — всходы	0,69
	Всходы — 3-й лист	0,76
	3-й лист — кущение	0,80
	Кущение — прекращение вегетации	0,81
	Возобновление вегетации — выход в трубку	0,76
	Выход в трубку — колошение	0,86
	Колошение — цветение	0,97
	Цветение — молочная спелость	0,84
	Молочная спелость — восковая спелость	0,68
Ячмень	Посев — всходы	(0,32)
	Всходы — выход в трубку	(0,40)
	Выход в трубку — появление нижнего узла соломы	(0,56)
	Появление нижнего узла соломы — колошение	0,76
	Колошение — молочная спелость	0,85
	Молочная спелость — восковая спелость	0,79
	Восковая спелость — полная спелость	0,73

Примечание. В скобках — коэффициенты, полученные по меньшему числу данных.

Чтобы получить представление о потребности растений во влаге необходимо суммы испаряемости за межфазный период (декаду) умножить на соответствующий биологический коэффициент или, иначе, кривую испаряемости совместить с биологической кривой. Полученные таким образом количественные показатели потребности растений во влаге в отдельные периоды жизни позволяют построить общую кривую потребления воды растениями при оптимальных условиях увлажнения.

Метод Д. Л. Лайхтмана отличается от изложенных выше тем, что позволяет сразу оценить суммарное испарение с оптимально увлажненного поля, а не испаряемость; он разработан применительно к расчету оросительных мероприятий.

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 для участков:

$$\text{неорошенного} \quad E' = X' - f + \Delta\omega'; \quad (38)$$

$$\text{орошенного} \quad E = X - f + \Delta E + \Delta\omega, \quad (39)$$

где  $E$  — суммарное испарение;  $X$  — осадки;  $\Delta\omega$  — изменение влагозапасов почвы;  $f$  — полный сток (поверхностный и грунтовый);  $\Delta E$  — норма орошения. Штрихами в формуле (38) 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, сток меняется незначительно, поэтому с некоторым допущением можно считать, что  $f = f'$ . Тогда из уравнений (38) и (39) следует:

$$\overline{\Delta E} = E - E' + \Delta\omega' - \Delta\omega. \quad (40)$$

Разность  $E - E' = \Delta E$  характеризует дополнительное испарение, создаваемое в результате орошения. Следовательно,

$$\overline{\Delta E} = \Delta E - (\Delta\omega - \Delta\omega'). \quad (41)$$

Как следует из уравнения (41), оросительная норма  $\overline{\Delta E}$  расходуется на дополнительное испарение  $\Delta E$  и на изменение влагозапасов почвы. При этом суммарное испарение с орошаемого поля  $E$  равно

$$E = E' + \Delta E. \quad (42)$$

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 интенсивности турбулентного обмена и разности относительной влажности поступающей на орошаемое поле воздушной массы и воздуха в растительном покрове.

Оптимальная относительная влажность воздуха в растительном покрове ( $r\%$ ) является в этом методе фитоклиматическим показателем, характеризующим особенности растительного покрова. Величина  $r$  меняется в зависимости от вида сельскохозяйственных культур и фазы их развития. В среднем для орошаемых сельскохозяйственных культур  $r$  колеблется в пределах 50—90%. Максимальные  $r$  наблюдаются в фазу цветения.

Общий вид формулы для определения  $\Delta E$ :

$$\Delta E = f_0 C(z) + F_0 D(z), \quad (43)$$

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 определения  $\Delta E$  по уравнению (43) И. Г. Горбунова предложила номограммы, позволяющие довольно просто найти 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 суммарного испарения или влагопотребности, в условиях климата умеренных широт результаты расчета всеми методами получаются близкими.

Суммарное испарение с оптимально увлажненного поля, рассчитанное с учетом биологических коэффициентов или с помощью метода Д. Л. Лайхмана, где фитоклиматическим показателем служит влажность воздуха внутри растительного покрова, может быть использовано для оценки влагопотребности растений.

У ранних зерновых культур (ячмень, овес, пшеница) кривая влагопотребности крутая, с четко выраженным максимумом. У поздних культур (хлопчатник, картофель, капуста) она плавная, максимум растянут. На рис. 12 показаны кривые влагопотребности, полученные по методу А. М. Алпатьева. Эти кривые для всех культур имеют один максимум, асимметрично сдвинутый вправо и наблюдающийся в фазу цветения.

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 этот период вызывает максимальное снижение урожая. Дефицит влаги и в другие периоды приводит к снижению урожая, но в меньшей степени, чем в критический.

По данным Ф. Д. Сказкина, у разных растений критический период наступает в различные фазы развития:

Озимая рожь . . . . .	} Выход в трубку — колошение
Озимая пшеница . . . . .	
Яровая пшеница . . . . .	
Овес . . . . .	
Ячмень . . . . .	
Кукуруза . . . . .	Цветение — молочная спелость
Подсолнечник . . . . .	Образование корзинок — цветение
Хлопчатник . . . . .	Цветение — заложение коробочек
Бахчевые . . . . .	Цветение — созревание
Картофель . . . . .	Цветение — формирование клубней
Томаты . . . . .	Завязывание плодов — созревание

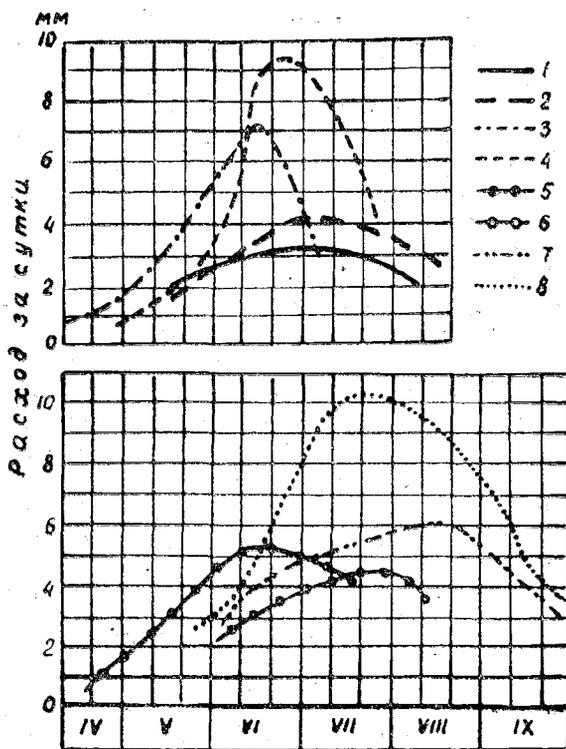


Рис. 12. Кривые валового потребления воды растениями при оптимальной влажности почвы:  
 1—овес (Ленинградская область); 2—яровая пшеница (Средний Урал); 3—яровая пшеница (Северный Кавказ); 4—просо (Приаралье); 5—картофель (Средний Урал); 6—картофель (Украина); 7—капуста кочанная (Украина); 8—хлопчатник (Средняя Азия)

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

Под влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур понимают степень их обеспеченности влагой. Для ее оценки прибегают к косвенным показателям, в частности к расчету коэффициента увлажнения, который представляет собой отношение одной или нескольких компонент водного баланса корнесбитаемого слоя (чаще всего осадков, запасов влаги в почве или суммарного испарения) к испаряемости.

Наиболее часто используется следующая формула:

$$K = \frac{x}{\Sigma E_0}, \quad (44)$$

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 работах разных ученых эта формула несколько видоизменяется. В трудах Н. В. Бовы, А. П. Федосеева, Н. Г. Грибковой и других помимо осадков вегетационного периода учитывается также запас доступной растениям влаги в 100-см 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

$$K = \frac{w_H + x}{\Sigma E_0}, \quad (45)$$

где  $w_H$  — запас доступной влаги (которая в дальнейшем будет называться продуктивной) в 100-см слое почвы перед посевом.

В работах Г. Т. Селянинова, как отмечалось ранее, суммарный расход воды на испарение при оптимальном увлажнении оцени-

вается по сумме температур выше 10°. Поэтому коэффициент увлажнения записывается

$$K = \frac{x}{0,1 \Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}}}, \quad (46)$$

где  $x$  — осадки за период с суммой температур выше 10°.

В таком виде коэффициент называется гидротермическим (ГТК). Гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова получил широкое применение в работах по оценке влагообеспеченности сельскохозяйственных культур.

В мелиоративной гидрологии для оценки обеспеченности растений влагой применяется коэффициент влагообеспеченности ( $\eta$ ) (М. И. Будыко, С. И. Харченко, С. В. Нерпин)

$$\eta = \frac{E}{E_0}, \quad (47)$$

где  $E$  — фактическое суммарное испарение;  $E_0$  — испаряемость.

В отечественной и зарубежной агрометеорологии помимо названных используют и другие методы оценки влагообеспеченности.

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. 9).

Таблица 9

Обеспеченность кукурузы влагой за вегетационный период

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

## Основные виды почвенной влаги и механизм ее передвижения

Почвенная влага играет важную роль в жизни растений. Однако не все виды ее одинаково усваиваются растительным организмом. Процесс усвоения воды корневыми волосками зависит от многих причин, в том числе от ее физического состояния, степени связанности с почвенными частицами, дисперсности почвы (наличия в почве мельчайших пор и отверстий, обуславливающих огромную поверхность взаимодействия воды с почвой). Почвенная влага вкраплена в поры почвы, отдельные элементы ее часто не связаны друг с другом. В природных условиях отдельные почвенные частицы как бы склеиваются и образуют агрегаты. В хорошо обработанных почвах такие агрегаты практически отсутствуют. Почвенная влага размещается в порах, образованных при соприкосновении как агрегатов, так и отдельных почвенных частиц. Поведение ее в большой степени зависит от размера и строения пор, кроме того, от свойств воды. Вода в почве содержит ионы различных веществ, что определяет неоднородность физических и химических свойств, которые отличают ее от обычной воды, находящейся в массе. Вода содержится в почве в твердом, парообразном и жидком состояниях.

**Твердая влага** образуется в почве при температуре  $0^{\circ}$  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 находится жидкая вода. Молекулярные силы в замерзшей воде достигают десятков тысяч атмосфер, ввиду этого непосредственно в процессе водоснабжения растений лед участия не принимает.

**Парообразная влага** непосредственно растениями не усваивается, однако играет большую роль в процессе их водоснабжения. Поры почвы заполнены водяным паром, который перемещается в насыщенном воздухе из мест более влажных (с большей упругостью водяного пара) в менее влажные (с меньшей упругостью водяного пара). Подчиняясь законам движения газа в пористых неоднородных средах, перемещение частиц водяного пара вместе с воздухом происходит под влиянием градиента давления. Поэтому скорость движения пара в почве на несколько порядков больше скорости движения молекулярном диффузионном движении. Градиент давления создается в основном под влиянием изменения температуры и давления воздуха в почве. Следовательно, направление движения водяного пара определяется суточным и годовым ходом температуры и влажности почвенного воздуха.

**Жидкая вода** находится в почве в разных состояниях, которые принято называть категориями. Выделяют три таких категории воды: 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 (толщиной в несколько молекул) возникают огромные силы сцепления. В результате этого каждая молекула воды, осевшая на почвенной частице, связана с ее поверхностью силой от 50 до нескольких тысяч атмосфер. Эти силы так велики, что по своим свойствам вода близка к твердому телу, а перемещается только переходя предварительно в водяной пар. Плотность ее колеблется от 1,1 до 1,5 г/см<sup>3</sup>, теплоемкость равна 0,5 кал/г·°С, температура замерзания составляет —4°С. Экспериментальные исследования показали, что при охлаждении до —78°С в почве еще остается некоторое количество незамерзшей воды. По терминологии А. А. Роде она называется прочносвязанной. Тяжелые мелкодисперсные почвы содержат значительно больше прочносвязанной воды, чем почвы, состоящие из крупных частиц. Верхним пределом содержания такой воды является максимальная гигроскопичность, т. е. наибольшее количество влаги, которое может поглотить почва из насыщенного воздуха ввиду своей гигроскопичности. Прочносвязанную воду из-за огромных сил сцепления ее с почвой растения не усваивают.

По мере утолщения слоя молекул свойства связанной воды меняются. Внешние слои воды удерживаются меньшими силами, чем внутренние, силы сцепления уменьшаются до 10—50 атм. Такая вода называется рыхлосвязанной. Она образует вокруг почвенных частиц пленку (пленочная вода) толщиной в несколько десятков молекул воды. В почвенных порах она постепенно переходит в обычную воду. По своим физическим свойствам пленочная вода отличается от обычной воды в массе. Плотность ее 1,25 г/см<sup>3</sup>, а температура замерзания от —1,5 до —4,0°С. Пленочная вода способна перемещаться из мест с толстой пленкой в места с более тонкой. Этот вид влаги частично может усваиваться растениями, если сцепления меньше осмотического давления в корнях растений.

2. Капиллярная вода. Это вода, удерживаемая в почве менисковыми силами (силами поверхностного натяжения), величина которых зависит от формы и размера пор, концентрации почвенного раствора. Форма пор определяет радиус кривизны мениска воды, имеющего в почве вогнутую форму.

В почве — густая 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, удерживается в почве силами  $\leq 0,5$  атм и замерзает при температуре около 0°С. Посте-

пенно утолщаясь, слой воды полностью закрывает капилляры, и почва переходит в состояние капиллярного насыщения (вода закрытых капилляров). При этом вода удерживается силами  $\leq 0,5-50$  атм и замерзает при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Оба вида почвенной влаги усваиваются растениями и составляют основной запас поглощаемой ими воды. Если вода в капиллярах не соединяется с грунтовой, ее называют капиллярно-подвешенной. В случае, когда капиллярная вода соединяется с грунтовой (т. е. как бы подпирается ею), используется термин капиллярно-подпертая вода. Капиллярная вода движется от более влажных мест к более сухим и поэтому играет существенную роль в водоснабжении растений.

В природных условиях расположение отдельных порций капиллярной влаги может быть таким, что эта влага не сообщается с основной массой воды и существенной роли в водоснабжении растений не играет. Отдельные порции воды называются манжетами. Передвижение такой воды возможно только с переходом ее в пар.

В ненасыщенных влагой почвах движение капиллярной воды происходит от точек меньшей кривизны менисков к точкам с большей их кривизной. Передвижение в этом случае возможно как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. При полном смачивании почвы водой высота капиллярного поднятия от уровня грунтовых вод вверх может быть выражена формулой

$$h = \frac{2\alpha}{g\rho r} = \frac{2,74}{981 r} = \frac{0,15}{r}, \quad (48)$$

где  $h$  — высота капиллярного поднятия, см;  $\alpha$  — поверхностное натяжение жидкости (для воды равно  $74$  дин/см);  $g$  — ускорение силы тяжести ( $981$  см/с<sup>2</sup>);  $\rho$  — плотность жидкости;  $r$  — радиус капилляра, см.

Эта формула применима в тех случаях, когда  $r > 0,005-0,00025$  см.

В природных условиях самый высокий подъем капиллярной влаги над уровнем грунтовых вод на тяжелых почвах не превышает  $6$  м, а на легких —  $2$  м. Наилучшей водоподъемной способностью обладают суглинки, а не глины, так как вода передвигается в почве не по всему почвенному капилляру, а лишь по его части, свободной от связанной воды, которой много в глинистых почвах. Кроме того, в узких капиллярах глинистых почв очень велика сила трения, замедляющая подъем воды.

Если почвенная влага не смыкается с грунтовой водой (подвешенная вода), то передвижение такой влаги происходит до тех пор, пока влажность почвы не снизится до некоторого предела, соответствующего разрыву слоя капиллярной влаги. Мощность слоя подвешенной воды зависит от характера капилляров. В почвенном капилляре может удерживаться в подвешенном состоянии

столбик воды, вес которого не превышает максимально возможную разность поверхностных давлений в самом широком и самом узком участке этого капилляра.

3. Гравитационная вода содержится в порах сверхкапиллярной воды и перемещается под влиянием силы тяжести вниз. Движение гравитационной воды описывается законом Дарси:

$$V = -K_{cp} \frac{dp}{dr}, \quad (49)$$

где  $K_{cp}$  — коэффициент пропорциональности (коэффициент фильтрации), зависящий от размера почвенных частиц, объема пор, величины трения и т. д.;  $\frac{dp}{dr}$  — градиент давления, характеризующий гидравлический напор вдоль заполненных водой пор;  $V$  — скорость движения потока гравитационной воды.

Гравитационная 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.

#### Термодинамические условия передвижения почвенной влаги

В почве одновременно могут присутствовать почти все категории почвенной влаги. Она может находиться в состоянии термодинамического равновесия, при этом молекулы воды совершают хаотическое движение с равной вероятностью в разных направлениях. Если же появляется сила или несколько сил, заставляющих молекулы воды перемещаться в определенном направлении, то возникает направленное движение. Этот направленный поток влаги может способствовать увлажнению корнеобитаемого слоя или, наоборот, его высушиванию. Силы, вызывающие направленное движение воды, можно разделить на внутренние и внешние.

Внутренние силы возникают в результате взаимодействия частичек почвы с водой. К ним относятся: гигроскопическая сила, сила поверхностного натяжения, осмотическое давление, возникающее при наличии в почвенной влаге растворенных веществ. К внешним следует отнести силу тяжести, силы механического давления, передающиеся через твердую, жидкую и газообразную среды, а также силы, вызванные наличием температурного, электромагнитного и других полей. Величина этих сил различна и их роль в разные моменты времени неодинакова.

На движущуюся в определенном направлении порцию воды одновременно действуют несколько сил. Совокупность сил, вызывающих направленное движение воды в почве, можно оценить, не

учитывая конкретных почвенных условий, механического и структурного состава почвы, с помощью термодинамического анализа.

В термодинамике почвенной влаги предполагается, что при ее движении выполняется работа, которая характеризует затраченную энергию. Энергия движущейся влаги складывается из запаса внутренней энергии ( $U$ ) и работы против внешних сил (давления). Кроме того, влага может отдавать или получать тепло извне. Для характеристики энергетического состояния почвенной влаги используется термодинамический потенциал ( $f$ ), который выражается следующей формулой:

$$f = U + A p v - T S, \quad (50)$$

где  $f$  — термодинамический потенциал системы почва—вода;  $U$  — внутренняя энергия;  $p$  — давление почвенного раствора;  $A$  — тепловой эквивалент работы;  $v$  — объем почвенного раствора;  $T$  — абсолютная температура системы;  $S$  — энтропия.

Изменение энергии рассматриваемого вещества представляет собой отношение количества теплоты, поглощаемого системой ( $\Delta q$ ), к абсолютной температуре ( $T$ ), т. е.

$$\Delta S = \frac{\Delta q}{T}, \quad (51)$$

отсюда

$$S = \int \frac{dq}{T} + S_0, \quad (52)$$

где  $S_0$  — энтропия системы в некотором состоянии, выбранном за начальное.

Термодинамический потенциал имеет следующие свойства:

- 1) в равновесных системах он минимален;
- 2) с повышением температуры при постоянном давлении уменьшается, так как в этом случае

$$df = -SdT; \quad (53)$$

3) при постоянной температуре с повышением давления раствора увеличивается;

4) при движении частицы в силовом поле возрастает, если частица движется против силового поля, и убывает, если она движется в направлении поля;

5) в неравновесной системе влага движется из точек с большим термодинамическим потенциалом к точкам с меньшим его значением. Термодинамический потенциал ненасыщенных почв отрицателен, а в том случае, когда почва полностью насыщена водой, он близок к нулю. Поэтому почвенная влага всегда перемещается из более влажной почвы в более сухую.

Термодинамический потенциал характеризует так называемую свободную энергию, которая может быть затрачена на перемеще-

ние почвенного раствора. В практических расчетах часто используют не уравнение термодинамического потенциала, а свободную энергию, записываемую через компоненты, которые можно непосредственно измерить;

$$df = \bar{V}dp_e + \bar{V}dp + da + dw + \mu gdh, \quad (54)$$

где  $df$  — свободная энергия;  $\bar{V}$  — удельный объем почвенной влаги;  $p_e$  — атмосферное давление;  $p$  — менисковое давление;  $a$  — сорбционные силы, возникающие на поверхности почвенных частиц;  $w$  — осмотическое давление, зависящее от концентрации почвенных растворов;  $\mu$  — молекулярная масса воды;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $h$  — высота стояния воды над условным уровнем сравнения.

Первое и последнее слагаемые непосредственно с почвой не связаны. Они могут быть измерены. Сумма остальных трех слагаемых равна натяжению почвенной влаги с обратным знаком, которое может быть измерено прибором — тензиометром. Это позволяет вычислить полный термодинамический потенциал по материалам измерений и оценить возможности перемещения почвенной влаги.

### Влажность почвы и методы ее определения

Содержание воды в почве в течение года заметно меняется, поэтому за влажностью систематически ведутся наблюдения. Количество влаги в почве (влажность) выражают в процентах массы 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 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 его — определение количества воды, имеющейся в почве, высушиванием образцов почвы. Этот метод предусматривает измерение всего количества содержащейся в почве воды — суммы почвенной влаги всех категорий. Вынутый из почвы образец взвешивается, затем при температуре 100—105° С высушивается в термостате до постоянного веса. Температура выше 100° необходима для отделения связанной воды. Разность массы образца до и после высушивания характеризует количество воды, содержащейся в почве. Расчет влажности  $\omega$  (%) производится по формуле

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\%, \quad (55)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — соответственно массы образца до высушивания и после высушивания.

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

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

*Метод, основанный на тепловых свойствах почвы.* Здесь в качестве показателей используются 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  $0,2 \text{ кал/г} \cdot ^\circ\text{C}$ , а воды —  $1 \text{ кал/г} \cdot ^\circ\text{C}$ , с увеличением влажности она 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, погруженных 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 малой атомной массы, 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 слабо. Одним из его недостатков является реагирование не только на свободные атомы водорода, но и на органические вещества, содержащие водород. Поэтому метод дает лучшие результаты в слоях почвы, бедных органическими веществами.

*Гаммаскопический метод*, разработанный А. И. Данилиным, основан на измерении ослабления гамма-лучей, проходящих через слой почвы. Слой почвы, находящийся между источником гамма-лучей и счетчиком гамма-квантов, ослабляет гамма-лучи. 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 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 растений влагой проводятся систематические наблюдения за влажностью почвы. Однако, как указывалось раньше, не вся имеющаяся в почве влага используется растениями. Они 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 несколько раньше, чем в почве осеется только прочносвязанная вода, т. е. когда присутствует еще и рыхлосвязанная. Влажность почвы, ниже которой жизнедеятельность растений не восстанавливается даже в воздухе, содержащем насыщенный водяной пар, называется влажностью устойчивого завядания. Поскольку она определяется малой подвижностью воды в почве, то почти не зависит от вида культур, но меняется от типа почвы. Ниже показана влажность завядания в процентах от массы абсолютно сухой почвы:

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

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 влаж-

ность почвы, полная влагоемкость выражается в процентах от массы 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

$h = \frac{0,15}{r} (r — \text{радиус капилляра})$ . По мере снижения уровня

грунтовых вод все большее количество пор будет освобождаться от воды и она 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 массы 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 для разных почв различны. На глинистых почвах кайма выше, на песчаных ниже и влажность ее меньше. 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 такая 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%, легких суглинистых — 15—20, среднесуглинистых — около 25, а 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. Количество ее сильно колеблется в пространстве и во времени. Поэтому для оценки обеспеченности растений влагой 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

$$w = v' - u', \quad (56)$$

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

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

$$v = \frac{v'}{m} \cdot 100, \quad (57)$$

$$u = \frac{u'}{m} \cdot 100, \quad (58)$$

где  $v$  — влажность почвы, %;  $u$  — влажность завядания, %;  $m$  — масса сухой почвы, г.

Отсюда

$$w = \frac{m}{100} (v - u). \quad (59)$$

Заменяя массу сухой почвы произведением удельной массы: и объема и принимая площадь поперечного сечения столба почвы равной 1 см<sup>2</sup>, получаем

$$w = \frac{h \cdot d}{100} (v - u), \quad (60)$$

где  $h$  — высота слоя, см;  $d$  — объемная масса почвы, г/см<sup>3</sup>. Переведя влажность почвы из граммов в миллиметры слоя воды, получим

$$w = 0,1h \cdot d(v - u), \quad (61)$$

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

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

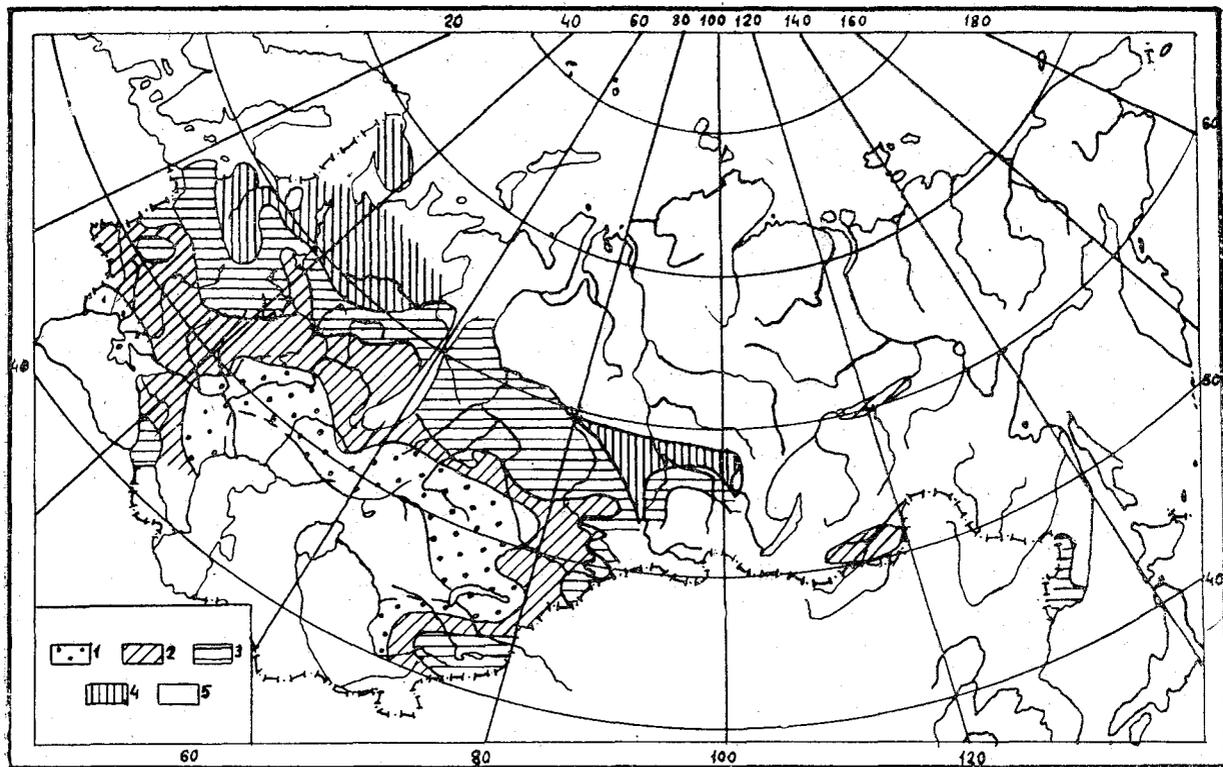


Рис. 13. Средние многолетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы под зябью ко времени наступления средней суточной температуры  $5^{\circ}\text{C}$  весной:

1-50-100 мм; 2-100-150 мм; 3-150-200 мм; 4-200 мм; 5-районы горные, поливные и с мало изученной влажностью почвы

влаги в почве является влагоемкость. Поскольку она, как и влажность завядания, сильно зависит от типа почвы, то и предельное содержание продуктивной влаги меняется в зависимости от ее состава (табл. 10).

Таблица 10

Содержание продуктивной влаги в метровом слое различных почв при насыщении, мм

Название станции	Тип почвы	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 показано на рис. 13.

### Водный баланс корнеобитаемого слоя почвы

Содержание продуктивной влаги в почве зависит от целого ряда процессов, связанных с приобретением влаги почвой или с ее расходованием. 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 осадкоммером влага попадает в почву и используется растениями. Часть ее испаряется с поверхности растений или идет на их смачивание, стекает на другие участки поля из-за неровностей и т. д. Степень улажнения

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, проникшее в почву ( $X_{п}$ ), которое носит название эффективных осадков.

Биологическая эффективность осадков зависит от глубины их проникновения в почву. 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 — около 50%. Накопление влаги за счет зимних осадков в разных природных зонах также неодинаково: в районах достаточного и избыточного увлажнения почвой усваивается не более 20—30% зимних осадков, в южных сухих зонах — не более 50%. Следовательно, биологически эффективными являются в среднем около 50% общей суммы осадков.

В районах с неглубоким залеганием грунтовых вод влажность корнеобитаемого слоя существенно меняется под влиянием подтока капиллярной воды ( $M_{г}$ ). По данным С. А. Вериги и Л. А. Разумовой, пополнение этого слоя водой путем капиллярной подачи ее снизу происходит в тех случаях, когда глубина залегания водного зеркала от нижней границы слоя не превышает для супесчаных почв 0,5—1,0 м, легкосуглинистых 1,0—1,5 м и тяжелосуглинистых 3,0—5,0 м. Дополнительными источниками запасов влаги корнеобитаемого слоя являются конденсация ( $\lambda$ ) и адсорбция ( $M_{п}$ ) водяного пара из воздуха. Однако надежных данных, позволяющих оценить эти составляющие водного баланса количественно, нет. Поэтому указанные источники влаги часто в расчетах не учитываются.

В изменении почвенной влажности принимает участие внутрипочвенная конденсация ( $M_{в}$ ). Этот процесс наблюдается в зимний период, когда водяной пар перемещается из глубоко лежащих теплых слоев в холодный корнеобитаемый. 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 происходит разными путями. Часть выпавших осадков, не сумевшая просочиться в почву, под влиянием рельефа стекает в виде поверхностного стока ( $f_{п}$ ). В равнинных районах поверхностный сток с сельскохозяйственных полей в вегетационный период мал, но очень возрастает весной при таянии снежного покрова. По данным П. Г. Кабанова, в зави-

симости от степени увлажнения почвы, глубины и характера ее промерзания, а также наличия ледяной корки стекает 1—98% всей талой воды. Просочившаяся в почву вода в свою очередь: частично теряется в виде внутрипочвенного стока ( $f_{в}$ ), а часть ее ( $f_{г}$ ) достигает уровня грунтовых вод. Однако основной расход влаги происходит путем испарения ее с поверхности почвы ( $E_{п}$ ) и транспирации ( $E_{т}$ ). Таким образом, полный водный баланс корнеобитаемого слоя почвы может быть выражен следующим уравнением:

$$\omega_{к} - \omega_{н} = (X_{п} + M_{г} + M_{п} + M_{в} + \lambda) - (E_{п} + E_{т} + f_{г} + f_{к} + f_{в}), \quad (62)$$

где  $\omega_{н}$  и  $\omega_{к}$  — начальный и конечный запасы влаги в почве;  $X_{п}$  — эффективные осадки;  $M_{г}$  — приток влаги в почву из грунтовых вод;  $M_{п}$  — приток влаги за счет адсорбции;  $M_{в}$  — приток влаги за счет внутрипочвенной конденсации;  $\lambda$  — вода, поступающая в почву за счет конденсации паробразной влаги из воздуха.

Если исключить из уравнения (62) элементы водного баланса, для которых нет надежных методов измерения или расчета, то в упрощенном виде оно записывается так:

$$\omega_{к} - \omega_{н} = (X_{п} + M_{г}) - (E_{п} + E_{т} + f_{г}). \quad (63)$$

Решение этого уравнения имеет ряд трудностей, связанных с отсутствием данных о величинах  $M_{г}$  и  $f_{г}$ . Поэтому в агрогидрометеорологических расчетах часто используют более упрощенное выражение:

$$\omega_{к} - \omega_{н} = X_{п} - E_{п} - E_{т}. \quad (64)$$

### Динамика запасов продуктивной влаги в почве

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

В теплый период основной процесс расходования влаги идет за счет испарения и транспирации. Уже ранней весной вместе с накоплением запасов влаги при снеготаянии большое количество ее расходуется на испарение. В это время в связи с наличием мерзлоты, не пропускающей воду вглубь, верхний слой почвы оказывается 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, 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 ее 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 максимальный расход ее наблюдается в начале вегетационного периода вследствие опускания капиллярной каймы. В основном изменение запасов влаги происходит в верхнем 50-см слое. В этой зоне различия в динамике запасов влаги на полях, занятых озимыми культурами, невелики (рис. 14). Лишь на чистом пару влажность почвы в течение всего теплого периода значительно выше, чем на полях, занятых сельскохозяйственными культурами. К осени различия сглаживаются.

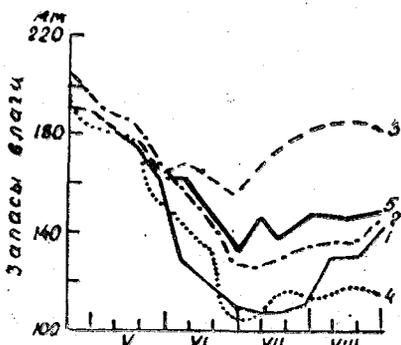


Рис. 14. Средние многолетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм) под различными культурами в зоне сильного увлажнения: 1—озимая пшеница; 2—яровая пшеница; 3—чистый пар; 4—клевер; 5—картофель

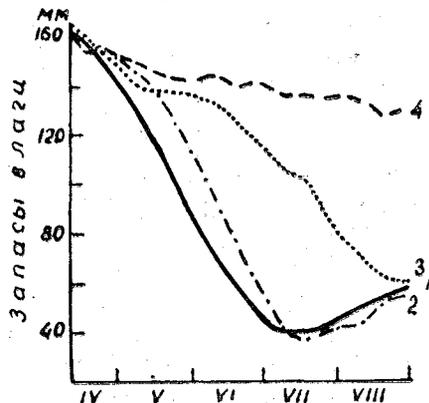


Рис. 15. Средние многолетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм) под различными культурами в зоне полного весеннего промачивания и глубокого стояния почвенно-грунтовых вод: 1—озимая пшеница; 2—яровая пшеница; 3—кукуруза; 4—чистый пар

В районах глубокого залегания грунтовых вод, где капиллярный подток отсутствует, путем транспирации влаги расходуется меньше. Максимальных значений расходы достигают в репродуктивный период, особенно в период выход в трубу — цветение, когда корневая система и наземная масса растений достигают наибольшей мощности. В противоположность зоне высокого увлажнения влага из слоя 0—100 см расходуется так же интенсивно, как и из слоя 0—50 см. В этом случае интенсивность ее расхода в большой степени зависит от вида и состояния произрастающей культуры.

Как видно из рис. 15, 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 во влажности на полях с озимой и яровой пшеницей 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 расход влаги как озимой, так и ранней яровой пшеницей уменьшается, разница в ее запасах 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 понижением температуры и малым расходом влаги на транспирацию и испарение запасы ее начинают постепенно расти как на полях, занятых сельскохозяйственными культурами (озимые), так и на зяби. В зимние месяцы происходит более или менее интенсивное насыщение почвы за счет осадков, проникновения в почву талых вод и путем внутрпочвенного передвижения влаги при промерзании. В это время совсем отсутствует транспирация и очень мало испарение с почвы.

### 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. Вериги выделила четыре агрогидрологические зоны (рис. 16), отличающиеся особенностями годового хода запасов продуктивной влаги (рис. 17), а также степенью соответствия этих особенностей потребностям зерновых культур во влаге.

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 поверхности почвы. Зимой в мерзлом слое почвы идет быстрое 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 испаре-

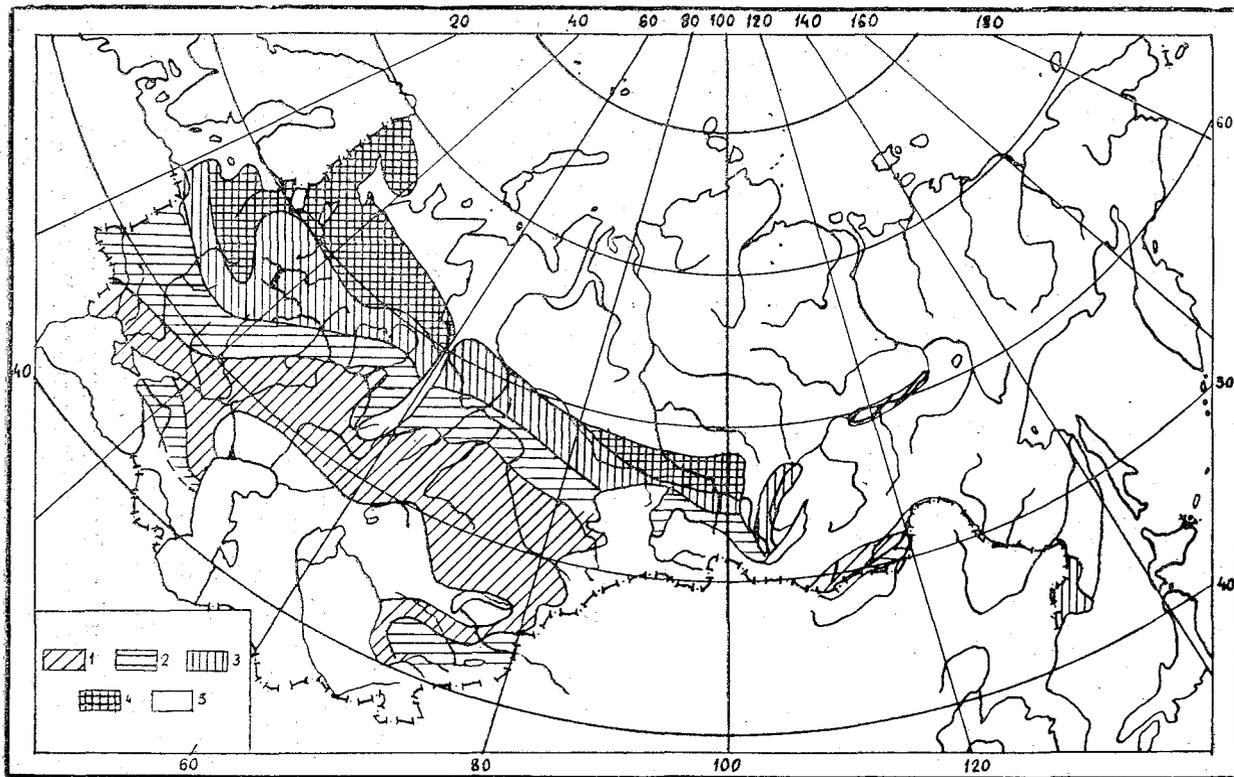


Рис. 16. Агрогидрологические зоны СССР:

1 и 2—слабого и полного весеннего промачивания; 3—капиллярного увлажнения; 4—обводнения; 5—районы горные, поливные и мало изученной влажностью почвы

ние и транспирацию компенсируются капиллярным поднятием, так что запасы влаги изменяются очень медленно. Как только капиллярная кайма начнет углубляться, сразу возникают резкие потери влаги вследствие передвижения ее вниз под влиянием силы тяжести. Годовой минимум запасов 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:

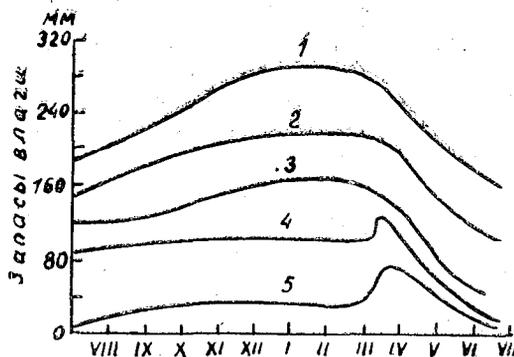


Рис. 17. Типы годового хода запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под озимыми культурами, посеянными по чистому пару:

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

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. Большое 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. Здесь 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 от-

дельные моменты выходит на поверхность. Зимний режим и годовой максимум запасов влаги в зонах капиллярного увлажнения и обводнения близки. Максимум запасов 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, а 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, из-за чего посевы могут сильно страдать. Ввиду насыщенности влагой и, следовательно, плохой аэрации нижних слоев почвы здесь, как и в зоне обводнения, корневая система осваивает лишь верхние слои почвы. Поэтому в сухие годы в течение 2—2,5 летних месяцев глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и отсутствия верховодок посевы могут страдать от недостатка влаги, причем яровые чаще, чем озимые. В связи с избытком увлажнения в ранне-весенний и позднеосенний 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 и равен наименьшей влагоемкости почвы. В метровом слое суглинистых почв он составляет 170—180 мм и лишь на мощных черноземах достигает 200 мм. Годовой минимум 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 иссуется лишь весной над мерзлым слоем почвы, несущим водное зеркало просачивающихся талых вод.

Для формирования урожаев зерновых культур условия водоснабжения благоприятны — характер изменения запасов продуктивной влаги во времени обычно соответствует потребности в ней растений в некоторые периоды их развития. Но в отдельные годы это соответствие может нарушаться и будут наблюдаться периоды острого недостатка влаги. Для озимых это возможно лишь в течение осенней вегетации; для яровых — на протяжении всего вегетационного периода. Вот почему 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 глубине меньше 1 м. Годовой максимум запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы здесь также наблюдается весной. Но и в это время, по многолетним данным, запасы влаги метрового слоя значительно ниже его наименьшей влагоемкости, а в наиболее 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 внутрипочвенные передвижения влаги не играют существенной роли — мерзлые слои сохраняют свою влажность практически постоянной.

В этой зоне водоснабжение растений сильно ограничено и периоды недостатка влаги являются обычными. Особенно часто острый недостаток ее отмечается во время формирования зерна яровых. Достаточное водоснабжение в течение всего периода вегетации зерновых культур наблюдается лишь в отдельные годы. Сухость нижних слоев почвы 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 ее 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 рассмотренных зон в природных условиях не являются резко очерченными. Вследствие различий в рельефе, почвах, 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 восточные, западные и южные. Северо-восточные склоны влажнее северо-западных, а юго-восточные влажнее юго-западных. Следовательно, наиболее сухими оказываются почвы вершин и склонов южной экспозиции.

#### § 4. РОЛЬ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ КОСВЕННОЕ ВЛИЯНИЕ НА РАСТЕНИЯ

##### Влажность воздуха

Влажность воздуха оказывает существенное влияние на состояние растений. От нее зависит интенсивность испарения с поверхности почвы и транспирация. С увеличением дефицита упругости водяного пара транспирация и испарение с почвы возрастают. Если при этом запас продуктивной влаги в почве велик, то в клетки растений поступает большое количество питательных веществ и интенсивность прироста органической массы повышается. Если же запас мал, то потеря воды на суммарное испарение при большом дефиците упругости водяного пара не компенсируется подтоком ее из почвы, ткани обезвоживаются, нарушается водный баланс растения. При сохранении такого состояния длительный период растительный организм повреждается и даже может погибнуть, что часто наблюдается при сильной засухе.

Очень высокая влажность воздуха тоже оказывает неблагоприятное воздействие на посевы. При небольшом дефиците упругости водяного пара в воздухе суммарное испарение мало, соответственно невелика и скорость подачи растворов из почвы. Поэтому замедляется прирост органической массы, у зерновых культур тормозится налив зерна и оно оказывается мелким. Высокая влажность воздуха в разные периоды может оказывать отрицательное влияние и на другие процессы, протекающие в растениях. Так, в период созревания она вызывает прорастание семян, загнивание соломы, во время цветения способствует увлажнению пыльцы и, следовательно, затрудняет процесс опыления. Влажность воздуха влияет и на выделение нектара. Например, гречиха и липа интенсивно выделяют нектар при высокой относительной влажности воздуха, а засухоустойчивые культуры — подсолнечник, кукуруза — при сравнительно низкой. При высокой относительной влажности воздуха быстро распространяются грибковые заболевания.

Большое влияние влажность воздуха оказывает на морфологию растений. Клетки растений, выращенных при низкой относительной влажности воздуха, независимо от степени увлажнения почвы имеют толстую кутикулу и слабую водопроницаемость оболочек, у них обычно мелкие, но толстые листья, мощная корневая система, небольшое число устьиц на единице площади и т. д. У некоторых видов культурных и дикорастущих растений эти признаки выражены очень резко. Такие растения называются ксерофитами. Наоборот, у растений, выращенных при относительной влажности выше средней, кутикула тонкая, оболочки легко пропускают влагу. У них плохо развита корневая система, чрезвычайно увеличена листовая поверхность, большое число устьиц на еди-

нище площади листа. Если эти признаки выражены резко, то растения называются гигрофитами.

Химический состав и качество сельскохозяйственной продукции также в большой степени зависят от влажности воздуха. Низкая относительная влажность способствует повышению содержания белка в зерновых культурах, сахара в плодовых. Это не значит, что качество всех растений улучшается при низкой влажности. Известно, что содержание крахмала в клубнях картофеля, наоборот, повышается при высокой относительной влажности воздуха. Следовательно, отдельные сорта и виды растений различно реагируют на условия с неодинаковой влажностью воздуха. Например, гречиха, лен, огурцы, сельдерей хорошо растут и дают высокий урожай при относительной влажности воздуха 85—95%. Для большинства овощных культур (капуста, брюква, горох, свекла и др.) оптимальными являются условия с относительной влажностью 70—80%. Теплолюбивые культуры (фасоль, томаты, перец) дают высокий урожай при относительной влажности воздуха 55—60%.

## Ветер

Ветер принято считать метеорологическим элементом, оказывающим отрицательное влияние на растения. Действительно, сильный ветер наносит им механические повреждения, ломает плодовые деревья, вызывает выдувание посевов и выветривание почв. Сильное действие оказывает ветер на характер залегания снежного покрова, оголяя возвышенные участки, что при очень низких температурах способствует вымерзанию посевов. Наоборот, накопление снега в пониженных частях рельефа нередко является причиной выпревания озимых культур. Примером отрицательного воздействия ветра на посевы являются черные и пыльные бури, суховей, существенно снижающие урожай. Эти явления рассматриваются в гл. IV.

Воздействие ветра на растения проявляется во все фазы их развития: в период цветения плодовых деревьев он сбивает цветы, выдувает пыльцу; в период созревания обивает зерна злаковых культур, срывает плоды с деревьев и т. д.

Однако можно отметить и положительную роль ветра в жизни растений. Так например, он существенно влияет на газообмен. При ветре наблюдается сильное перемешивание воздуха в приземном слое; следовательно, большое количество  $\text{CO}_2$  поступает к клеткам растений, интенсивнее становится фотосинтез.

Значительное влияние оказывает ветер на транспирацию растений и испарение с почвы. Усиление ветра вызывает повышение интенсивности турбулентного влагообмена растений и поверхности почвы с атмосферой. В условиях влажного климата ветер, повышая транспирацию, усиливает процесс всасывания растворов корневой системой, питание растений становится более интенсивным.

Но в засушливых условиях, где подток воды к корневой системе не может компенсировать затраты воды на испарение и транспирацию, усиление ветра может оказать отрицательное влияние, листья теряют тургор, что в итоге ведет к высыханию растений.

Ветер влияет и на температурный режим растений, изменяет условия внутри посевов. При нем быстрее удаляется водяной пар из посевов и поэтому уменьшается вероятность возникновения грибковых заболеваний. Велика роль ветра в опылении и размножении растений. Многие виды культурных и дикорастущих растений опыляются с помощью ветра. Установлено, что наиболее благоприятные условия опыления наблюдаются при скорости ветра 2—3 м/с. При больших скоростях пыльца выдувается и опыление замедляется.

### Снежный покров

Снежный покров играет большую роль в формировании температурного режима почвы и обеспечении растений влагой. Как и ветер, он оказывает и положительное и отрицательное влияние на растения. Положительная роль снежного покрова проявляется в том, что он влияет на водный баланс корнеобитаемого слоя. В период весеннего снеготаяния запасы продуктивной влаги в почве заметно возрастают. А в районах, где летние осадки малы (например, в зонах слабого и полного весеннего промачивания), от запасов воды в снежном покрове зависит влагообеспеченность растений. Установлено, что в этих зонах 20—30% почвенной влаги поступает при таянии снежного покрова. В связи с этим возрастает роль снежных мелиораций.

Зимой снежный покров может сохраняться на поверхности почвы в течение нескольких месяцев, при этом высота его, как правило, увеличивается в продолжении всей зимы, достигая максимума в феврале—марте. Обладая малой теплопроводностью, которая в 8—10 раз меньше теплопроводности почвы, снег защищает зимующие растения от вымерзания. Теплопроводность снежного покрова зависит от его плотности. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$\lambda = a \cdot d^2, \quad (65)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность снега;  $d$  — плотность снежного покрова;  $a$  — эмпирический коэффициент.

Плотность снега колеблется в широких пределах и заметно меняется от начала зимы к весне. Рыхлый свежеснеженный снег имеет плотность 0,05—0,10 г/см<sup>3</sup>. Плотность снежного покрова в течение зимы увеличивается в среднем на 10% за месяц. Наибольшая плотность — у слежавшегося, подтаявшего снега (0,5—0,7 г/см<sup>3</sup>), вследствие этого его теплопроводность больше. Теплозащитная

роль каждого сантиметра снежного покрова в начале зимы оказывается большей, чем в конце ее.

Важное значение для перезимовки растительных организмов имеет высота снежного покрова; рост которой способствует повышению температуры почвы и уменьшению амплитуды ее суточного хода. По данным В. А. Моисейчик, разность температуры почвы на глубине узла кущения (3 см) и воздуха меняется в широких пределах (табл. 11).

Таблица 11

Зависимость средней разности температуры почвы (на глубине 3 см) и воздуха от высоты снежного покрова на юго-востоке ЕТС

Высота снежного покрова, см	0	3	5	10	15	20	25	30	60
Разность температур, °С	4,0	5,8	6,5	9,0	11,8	13,3	14,1	15,2	17,2

А. М. Шульгин установил, что разность температуры почвы и воздуха при изменении высоты снежного покрова на 1 см меняется в среднем от 0,1 до 2,0° С. Из табл. 11 видно, что для предохранения озимых культур от низких температур не нужна большая высота снежного покрова. Так, при температуре воздуха —30° С для предохранения озимых, которые повреждаются при температуре ниже —16° С, достаточно, чтобы она составляла 25—30 см.

Отрицательная роль снежного покрова проявляется в том случае, когда высота его более 30 см сохраняется в течение нескольких месяцев. В результате этого при сравнительно высокой температуре под снегом растения подвергаются различным заболеваниям.

Большое значение для перезимовки озимых культур имеет характер залегания снежного покрова. По данным снегомерных съемок, снежный покров часто залегает неравномерно. В трудах А. А. Окушко, А. М. Шульгина, В. А. Моисейчик отмечается, что степень неравномерности его залегания тем больше, чем меньше средняя высота, при этом возрастает опасность повреждения посевов низкими температурами на больших площадях. На основе материалов снегомерных съемок В. А. Моисейчик установила следующую зависимость (табл. 12).

На полях с неравномерным залеганием снежного покрова в местах с большим скоплением снега наблюдается повреждение сельскохозяйственных культур в относительно теплые, а в местах с небольшой высотой снежного покрова — в суровые зимы.

Связь средней высоты снежного покрова с площадью поля  
(% от общей площади), занятой снежным покровом разной высоты

Средняя вы- сота снежного покрова по снегомерной съемке, см	Высота снежного покрова, см									
	0	1—3	4—6	7—10	11—15	16—20	21—30	31—50	51—80	81—100
1	70	24	5	1	0	—	—	—	—	—
2	46	33	17	4	0	—	—	—	—	—
3	27	38	25	9	1	0	—	—	—	—
4	18	30	36	13	3	0	—	—	—	—
5	10	25	39	21	5	0	—	—	—	—
6	7	19	34	29	10	1	0	—	—	—
7	5	16	30	35	12	2	0	—	—	—
8	2	11	25	41	15	6	0	—	—	—
9	2	7	18	42	23	7	1	0	—	—
10	1	7	14	38	28	9	3	0	—	—
11	1	4	12	37	37	13	4	0	—	—
12	1	3	9	29	38	16	4	0	0	—
13	0	3	7	24	37	19	9	1	0	—
14	0	2	6	21	35	23	11	2	0	—
15	0	2	5	17	33	27	14	2	0	—
16	0	2	4	14	29	29	19	3	0	—
17	0	1	4	13	25	30	23	4	0	—
18	0	0	4	10	23	31	26	6	0	—
19	0	0	2	9	21	30	32	6	0	—
20	0	0	2	8	19	28	33	10	0	—
21—30	0	0	1	3	9	21	44	21	1	0
31—50	0	0	0	0	1	5	25	63	6	0

## Глава III. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СРЕДИ РАСТЕНИЙ

### § 1. ПОНЯТИЕ О ФИТОКЛИМАТЕ

Микроклимат нижнего слоя атмосферы обычно рассматривают отдельно для двух областей, которым свойственны 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 законом, сформулированным физикой приземного слоя атмосферы.

В нижнем слое, расположенном между почвой и верхней границей растительного покрова, существуют закономерности, определяемые жизнедеятельностью растений. Метеорологический режим этого слоя называют фитоклиматом. Каждое сообщество растений создает свой фитоклимат, поэтому можно говорить, например, о фитоклимате картофельного поля или посевов пшеницы. В течение вегетационного периода фитоклимат отдельных полей не остается постоянным. Он изменяется как под влиянием метеорологических процессов, так и в результате изменения состояния посевов, проведения агротехнических мероприятий.

В течение вегетационного периода в зависимости от степени развития растений и густоты травостоя меняется положение деятельной поверхности, т. е. поверхности, которая непосредственно поглощает солнечную и излучает длинноволновую радиацию, отдает тепло и влагу в атмосферу. В случаях отсутствия растительного покрова деятельной поверхностью является поверхность почвы. При несомкнутом растительном покрове, например при возделывании пропашных культур (картофель, корнеплоды, виноградник) или очень редком травостое культур сплошного сева, деятельной 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 процессы, которые происходили раньше у поверхности земли, теперь происходят на некоторой высоте от нее, и деятельной поверхностью становятся листья и стебли растений.

При сомкнутом травостое все части растений, освещенные солнцем, участвуют в поглощении радиации, причем 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 деятельного 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. 18). Изменяется и распределение метеорологических элементов в слое растительного покрова, а также температура и влажность почвы под ним.

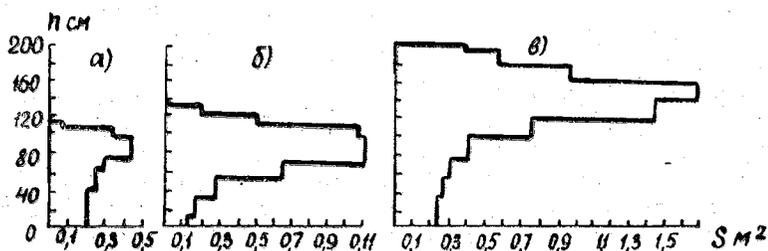


Рис. 18. Вертикальное распределение общей площади поверхности растений:

*а*—кукуруза, 3/VII 1963 г.; *б*—конские бобы, 10/IX 1962 г.; *в*—белый клевер, 20/VIII 1962 г.

Значительная часть листьев обычно располагается на высоте, равной 1/2 или 2/3 высоты растений, следовательно, на ней протекают основные процессы — поглощение солнечной радиации, фотосинтез, транспирация.

## § 2. РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ТРАВСТОЯ

Радиационный режим растительного покрова заметно различается в зависимости от вида растений, высоты расположения и ориентации листьев, их площади, отражательной способности и т. д. Основную роль в этом различии для отдельных частей растений играет поступление к ним коротковолновой радиации. 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% проходящей суммарной радиации (табл. 13).

Таблица 13

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

Место наблюдений	Суммарная радиация, кал/см <sup>2</sup> · мин	Процент от суммарной радиации
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. Измерения суммарной радиации в лесу на разных высотах над поверхностью почвы показали, что в околополуденные часы примерно половина ее (47%) протекает до уровня 2/3 крон. Наибольшее ослабление происходит в нижней более густой части крон, где задерживается около 40% радиации.

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

По мере роста растений существенно меняется их отражательная способность. По данным Б. М. Гальперин, проводившей опыты со злаковыми культурами, альbedo сельскохозяйственных растений меняется в процессе их роста. Как видно из рис. 19, с увеличением зеленой массы растений среднее альbedo поля возрастает, особенно у яровой пшеницы. Если в фазу кущения альbedo яровой пшеницы составляет 11%, то в период колошения она отражает уже 18—19% падающей энергии, а в период созревания — до 25%. После уборки хлебов альbedo поля резко падает (12—17%) и приближается к альbedo почвы.

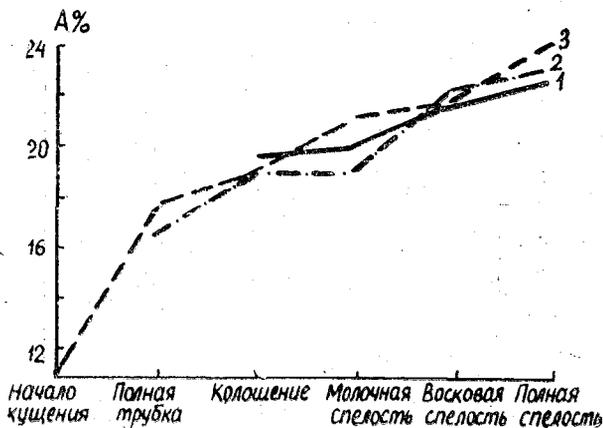


Рис. 19. Зависимость альbedo (А%) сельскохозяйственных растений от фазы их развития:

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

Ход изменения альbedo поля в зависимости от фаз развития растений у разных культур имеет много общего. Рост альbedo посевов на ранних фазах развития объясняется увеличением зеленой массы растений. В период созревания этот рост 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 обнаружится более сильное его увеличение при созревании.

### § 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 отмечалось, микроклимат поля не остается постоянным в течение вегетационного периода, он изменяется по мере роста растений. 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 наблюдается в первую половину лета, когда они находятся в фазе кущения — колошения. Корнеплоды и картофель, наоборот, наиболее чувствительны к влаге в период репродуктивного развития, как происходит формирование клубней. Эта особенность сельскохозяйственных растений находит свое отражение в соотношении элементов теплового баланса деятельной поверхности в разные межфазные периоды. Запишем уравнение теплового баланса поля

$$R = LE + P + B, \quad (66)$$

где  $R$  — радиационный баланс поля за определенный период;  $LE$  — затраты тепла на суммарное испарение с поля за тот же период;  $P$  — затраты тепла на турбулентный теплообмен растительного покрова с атмосферой;  $B$  — поток тепла в почву.

При этом суммарное испарение может быть представлено в виде

$$E = E_T + E_{II}, \quad (67)$$

где  $E_T$  — расход воды в процессе транспирации растений;  $E_{II}$  — испарение с поверхности почвы.

Поскольку величина  $B$  в летние месяцы значительно меньше  $LE$  и  $P$ , то основная часть радиационной энергии поля расходуется на суммарное испарение или на турбулентный теплообмен с атмосферой, что определяет временем наступления критического периода у сельскохозяйственных культур.

У зерновых культур (рис. 20) в критический период при достаточной влажности почти  $2/3$  всего радиационного тепла расходуется на суммарное испарение. В другие периоды затраты тепла на испарение меньше, значительная доля радиационного тепла расходуется на турбулентный теплообмен растений с атмосферой. У пропашных культур (по данным Ф. А. Муминова) суточные суммы элементов теплового баланса картофельного поля при оптимальном увлажнении меняются от фазы к фазе также вполне закономерно в соответствии с наличием критического периода у этой культуры во время репродуктивного развития (табл. 14).

Расход воды на транспирацию у картофеля резко увеличивается в репродуктивный период, превосходя в 1,5—2 раза испарение с поверхности почвы. При недостаточной влажности почвы это вызывает рост суммарного испарения в период формирования урожая. Некоторое снижение транспирации и затрат тепла на суммарное испарение для картофеля летней посадки в период после первого заморозка объясняется повреждением отдельных частей растения заморозком и частичным отмиранием ботвы. Поток тепла в почву как при весенней посадке, так и при летней в течение вегетационного периода меняется мало. Аналогичны результаты и для других пропашных культур.

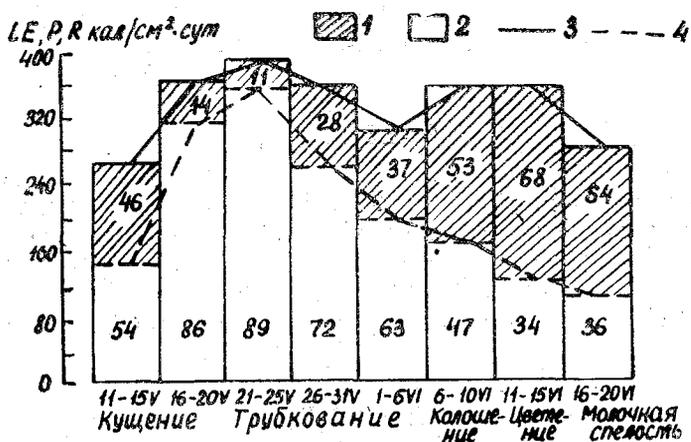


Рис. 20. Изменение теплового баланса на поле с пшеницей в течение вегетационного периода:  
1—P%; 2—LE%; 3 и 4—средние суточные суммы R и LE

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 уменьшаться и большая доля радиационного тепла пойдет на нагревание почвы и прилегающих слоев воздуха.

Таблица 14

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

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

#### § 4. ТЕМПЕРАТУРА И ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА В ТРАВСТОЕ

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 растений с атмосферой, от влажности почвы и воздуха, регулирующих транспирацию, и т. д. В свою очередь температура растений оказывает влияние на все эти процессы. 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 ее распределения над полями без растительного покрова, т. е. максимум температуры днем и минимум ночью наблюдается у поверхности почвы.

В период, когда растения достигают наибольшего развития (фазы колошения, цветения, молочной спелости), максимум и минимум температуры смещаются вверх, до высоты наиболее густой части растительного покрова. Затем по мере усыхания листьев и стеблей экстремальные значения температуры наблюдаются ближе к почве, а после уборки урожая — на ее поверхности (рис. 21).

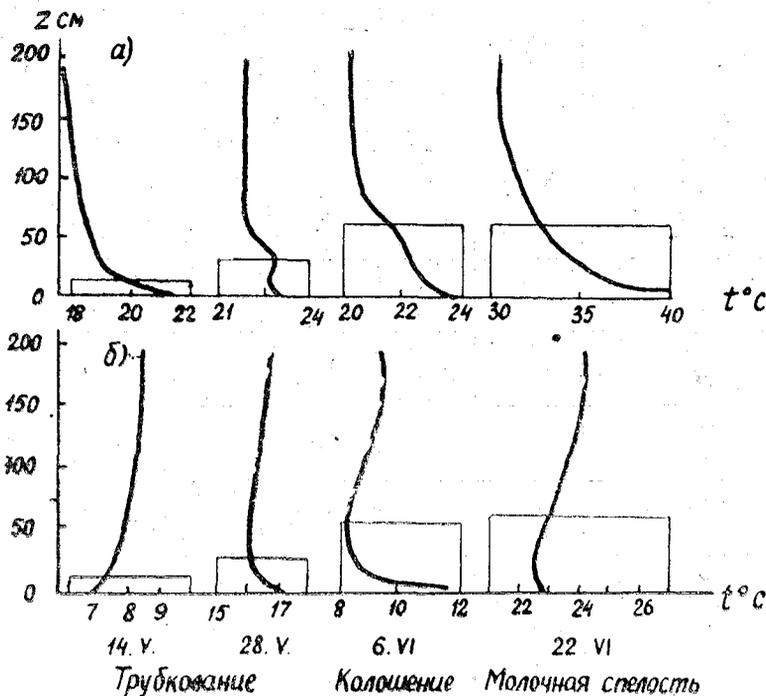


Рис. 21. Температура воздуха на разных высотах посевов ячменя: а — день; б — ночь. Верхняя граница прямоугольников показывает среднюю высоту растений в различные фазы развития.

Ночью растительный покров поглощает излучаемую почвой радиацию и предохраняет ее от сильного охлаждения. Сам растительный покров охлаждается в результате излучения длинноволновой радиации. Поэтому минимальная температура воздуха ночью наблюдается на поверхности наиболее густой части травостоя. Растительный покров существенно влияет на характер вертикального распределения температуры при сомкнутом травостое, препятствующем опусканию холодного воздуха вниз до поверхности почвы. 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.

Вид кривой изменения температуры с высотой внутри растительного покрова в значительной мере зависит от степени водоснабжения растений. При недостаточном обеспечении растений влагой транспирация уменьшается, что вызывает повышение их температуры и вероятность перегрева. По данным Г. В. Белухиной, в дни с суховеями разность температуры в психрометрической будке и у верхнего края растений (пшеница) сильно меняется под влиянием суточного хода транспирации (рис. 22). Как и при прочих условиях, днем воздух вблизи травостоя теплее, чем на уровне

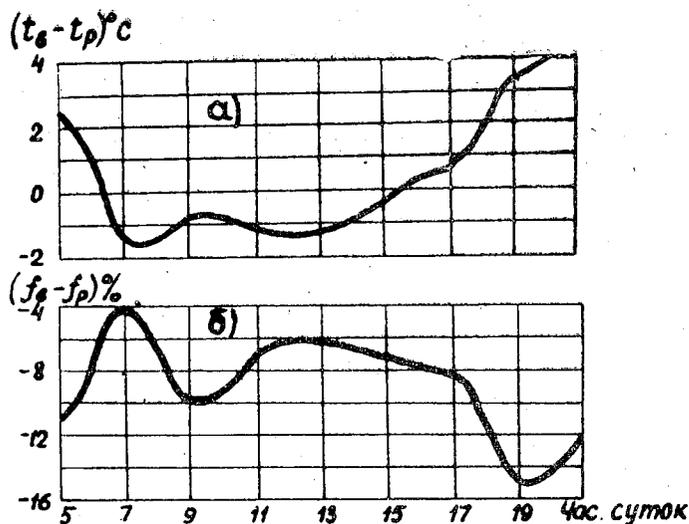


Рис. 22. Суточный ход разностей температуры (а) и относительной влажности воздуха (б) в метеорологической будке и у верхнего края растений (ст. Ершов).

психрометрической будки, а ночью холоднее. При этом кривая разности температуры имеет днем два максимума и два минимума. До восхода солнца, вследствие интенсивного излучения тепла поверхностью растений, воздух у поверхности 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 очень малой трансформацией в первые утренние часы, в результате потеря тепла на нее невелика, благодаря чему к 7 часам утра температура поверхности травостоя в среднем на 1—2° выше, чем на уровне 2 м. В поздние утренние часы потеря тепла на транспирацию увеличивается, нагрев воздуха у поверхности растений замедляется и температура его 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 от недостатка влаги наблюдается снижение тургора. Поэтому температура у поверхности растений становится на 1—2° С выше, чем на уровне 2 м. После полудня приток солнечного тепла 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 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 на высоте растений в вечерние и ночные часы она 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 еще в большей мере, чем температура, является результатом жизнедеятельности растений. Растительный покров представляет собой обширную испаряющую поверхность, вследствие чего воздух, непосредственно окружающий растение, всегда 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 сужаются, испаряющая поверхность перемещается внутрь листа и относительная влажность воздуха у поверхности листьев понижается. С удалением от поверхности растений влажность воздуха уменьшается.

Многочисленные экспедиционные исследования показали, что при достаточном содержании влаги в почве относительная влажность воздуха внутри травостоя равна в среднем 60—70%. Вертикальное распределение влажности таково, что при выходе из него она уменьшается, и чем дальше от растительного покрова, тем становится все меньше. Эта закономерность наблюдается как днем, так и ночью (рис. 23). Характер вертикального распределения относительной влажности в приземном слое воздуха при наличии травостоя зависит от фазы развития растений. В ранние фазы (от кущения до колошения), пока запасы влаги еще значительны, относительная влажность воздуха на высоте растений почти всегда выше влажности на высоте 2 м. В последние фазы (восковая и полная спелость) транспирация уже невелика, вследствие чего относительная влажность на уровне колосьев в дневные часы мало отличается от влажности в будке.

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 запасов продуктивной влаги в почве, определяющих характер деятельности устьичного аппарата. Поэтому в дни с суховеями (см. рис. 22) в полуденные часы, когда транспирация уменьшается в результате регулирующей способ-

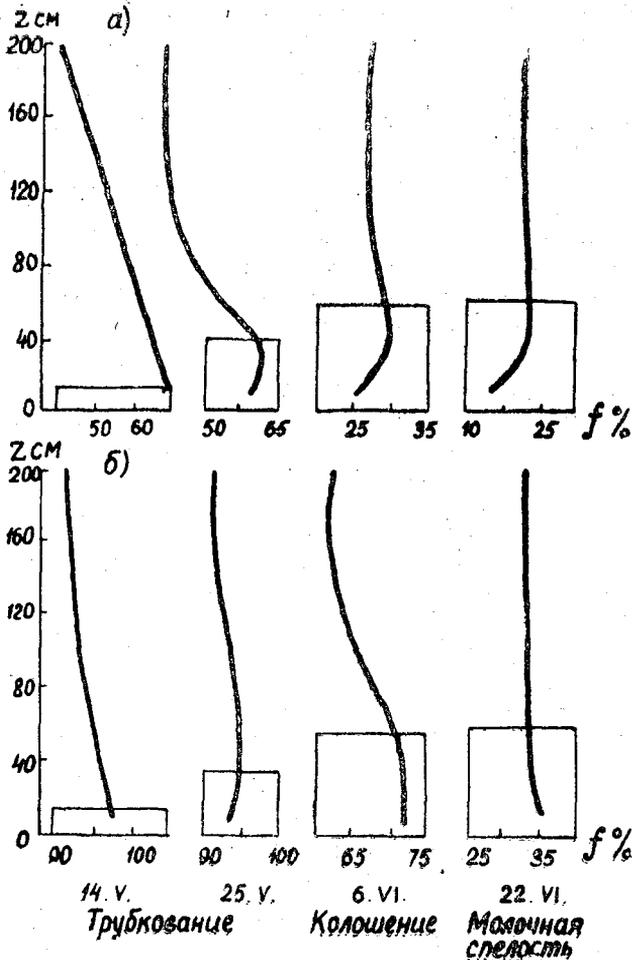


Рис. 23. Относительная влажность воздуха на разных высотах посевов ячменя:  
а—день; б—ночь

ности клеток устьиц, относительная влажность вблизи растительного покрова тоже заметно уменьшается и приближается 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, он способствует некоторому понижению ее температуры, ночью задерживает длинноволновую радиацию, излучаемую земной поверхностью, и тем способствует повышению ее температуры. Высушивая в процессе транспирации почву, растительность уменьшает ее теплопроводность и 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 днем температура почвы, покрытой растительностью, заметно ниже, чем на участке, лишенном покрова, ночью же, наоборот, выше.

Воздействие растений на температурный режим почвы зависит от их особенностей, 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 сухой растительной массе 10 г на 1 м<sup>2</sup> была равна 24,2° С, 90 г на 1 м<sup>2</sup> 22,4° С, а 510 г равна 17,6° С. Однако температура почвы, покрытой сухой редкой травой, в теплое время года часто выше, чем оголенной, вследствие свободного проникновения коротковолновой радиации к почве и одновременного уменьшения турбулентного теплообмена с воздухом. Различные сельскохозяйственные культуры, обладая неодинаковой зеленой массой, в разной мере меняют температурный режим почвы. Для примера приведем данные, полученные А. М. Шульгиным (табл. 15).

Таблица 15

Температура, °С, почвы на глубине 3 см под разными культурами в 13 часов.  
Нальчик, 2—16 июля

Число месяца	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

Еще больше способствует охлаждению почвы летом лесная растительность. Степень влияния леса на температуру почвы зависит от сомкнутости и высоты деревьев.

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

Вспашка меняет составляющие теплового баланса деятельного слоя почвы. При наиболее распространенной отвальной вспашке влажная почва нижних горизонтов оказывается на поверхности, в результате чего увеличивается испарение и уменьшается затрата тепла деятельным слоем на турбулентный теплообмен с атмосферой. В последующие дни почва просыхает и затрата тепла на испарение резко уменьшается. Следовательно, влажность почвы на вспаханном участке становится меньше, чем на необработанном поле. При вспашке изменяется и температурный режим почвы. Теплопроводность и теплоемкость рыхлой почвы меньше, чем невспаханной, что вызывает уменьшение теплообмена в пахотном горизонте. Днем поверхность вспаханного поля теплее, а ночью холоднее невспаханного. Распространение температурных колебаний вглубь почвы на вспаханном поле происходит медленнее, чем на невспаханном, вследствие чего после вспашки почва на глубинах оказывается днем холоднее, а ночью теплее.

Степень прогрева почвы на вспаханном участке в период вегетации растений зависит от 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 на 5° С. 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°.

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

Различия в температурном режиме почв, создаваемые растениями, обычно усиливаются в зависимости от агротехнических приемов, используемых на полях (табл. 16).

Таблица 16

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

Число месяца	Посев			
	Сплошной	Широкорядный, см		Пар
		70×3	70×12	
13	17,5	17,7	21,0	22,3
15	24,0	23,0	29,0	32,5
28	25,5	26,0	32,5	33,0

Как видно из табл. 16, применением различных 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 при мульчировании, которое состоит в покрытии ее поверхности тонким слоем красок, бумажных или пленочных покрытий. При этом изменяется отражательная и в меньшей степени излучательная способности поверхности почвы. При использовании черных красителей (угольная пыль, черная краска) несколько возрастает излучательная способность 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. Это в свою очередь вызывает дальнейшее понижение температуры слоя воздуха среди растений (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 чаще производятся поливы. Поэтому естественно, что фитоклимат орошаемых полей сильно зависит от режима орошения. Периодически орошаемые поля и поля с постоянным затоплением характеризуются различными фитоклиматическими особенностями.

Наибольшие изменения метеорологических элементов при орошении наблюдаются на полях с постоянным затоплением. Влияние орошения проявляется как в изменении поглощения коротковолновой солнечной радиации, так и в длинноволновом балансе. Известно, что при орошении поля суммарная радиация фактически не меняется. В результате различий альbedo растений в первые фазы развития поглощенная радиация на орошенном участке заметно выше, чем на неорошенном, где альbedo больше и составляет 20—22%, практически не меняясь в течение летнего периода. В фазу созревания эти различия исчезают: поглощенная радиация на орошенном и неорошенном участках в полуденные часы отличается не более чем на  $0,05 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$ .

Баланс же длинноволновой радиации на рассматриваемых полях различается существенно. Из-за более низкой температуры деятельной поверхности на орошенном поле уменьшается излучение длинноволновой радиации и одновременно, вследствие повышения влажности воздуха, несколько возрастает противозлучение атмосферы. Следовательно, при одинаковом поступлении суммарной солнечной радиации в дневные часы радиационный баланс на орошаемом рисовом поле больше, чем на неорошаемом участке. В целом на радиационный баланс орошаемого поля влияют особенности растительного покрова. В начальные фазы развития растений, когда занимаемая ими площадь невелика, основную роль в этом балансе играет наличие поливной воды на поле. В дальнейшем густота сомкнутого травостоя растений основное влияние оказывает на радиационный баланс деятельной поверхности. Ночью радиационный баланс орошаемого поля несколько меньше, чем неорошаемого, что является следствием более сильного излучения деятельного слоя поля в результате сравнительно высокой его температуры.

Значительная 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 тем-

пературы воздуха над полем. Максимальные отрицательные значения турбулентного потока тепла на орошенном поле обычно приходятся на послеполуденное время (13—14 часов), когда радиационный баланс явно не обеспечивает затраты тепла на испарение. Из рис. 24 видно, что на рисовом поле (полное затопление) в отдельные межфазные периоды затраты тепла на испарение превышают радиационный баланс.

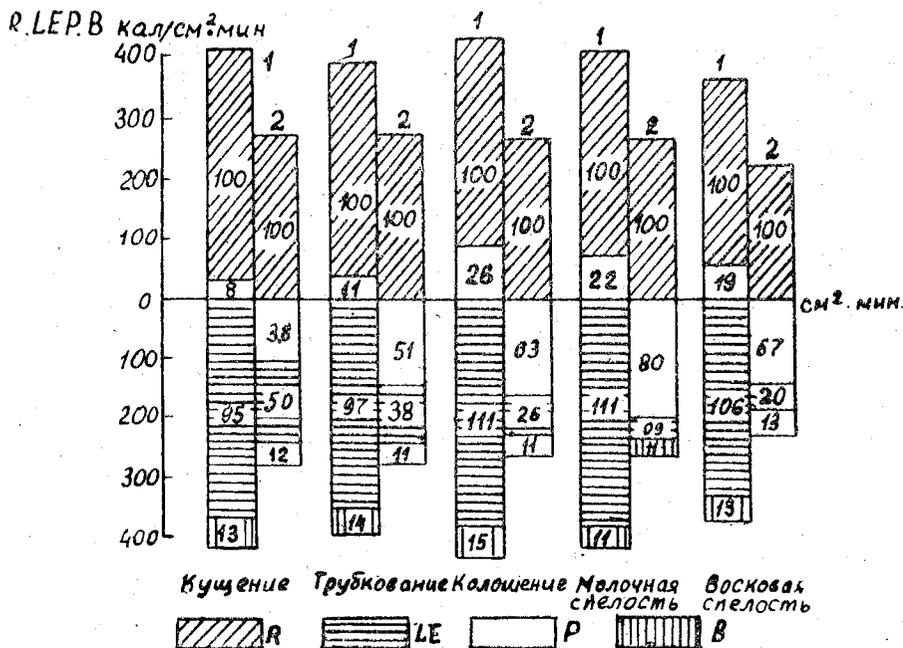


Рис. 24. Соотношение дневных сумм составляющих теплового баланса в разные фазы развития риса:

1—рисовое поле; 2—неорошаемый участок;  $R$ —радиационный баланс;  $LE$ —затраты тепла на испарение;  $P$ —турбулентный теплообмен деятельной поверхности с атмосферой;  $B$ —теплообмен в почве

Теплообмен в почве в условиях орошаемого поля, как показали исследования М. Жапбасбаева, практически не меняется по фазам развития сельскохозяйственных культур. В среднем поток тепла в почву на орошенном участке за счет увеличения теплопроводности несколько больше, чем на неорошенном, что улучшает температурные условия жизни корневой системы. Травостой вносит существенное изменение в температуру и влажность воздуха. Днем температура интенсивно транспирирующих растений всегда ниже температуры воздуха, что способствует охлаждению последнего вблизи поверхности травостоя. Одновременно с этим повышается влажность воздуха.

Рассматривая вертикальное распределение температуры приземного слоя воздуха при орошении, ее минимум днем отмечают 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 этом слое на 2—3° выше, чем на неорошаемом участке, хотя и здесь наблюдается инверсия. В результате амплитуда суточного хода температуры воздуха на орошенном участке значительно меньше, чем на неорошенном, причем на первом она увеличивается с высотой, а на последнем уменьшается.

Относительная влажность над орошенным участком больше, чем над неорошенным, при этом разность между ними может составлять 10—40%.



## Глава IV. НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И МЕРЫ БОРЬБЫ С НИМИ

Метеорологические и гидрологические условия не всегда соответствуют потребностям растений. В ряде случаев наблюдаются такие явления, при которых не только снижается урожай, но повреждаются и даже гибнут растения. Эти явления называются неблагоприятными, а иногда опасными. Неблагоприятные для сельского хозяйства явления наблюдаются во все сезоны года. В летний период большой ущерб наносят засухи, суховеи, пыльные бури, град; весной и осенью растения страдают от заморозков; в зимний период они повреждаются в результате вымерзания, выпревания, вымокания, зимней засухи, ледяной корки. Часто одно неблагоприятное явление сопровождается другим, что затрудняет их изучение, прогнозирование и осложняет борьбу с ними. Ущерб, наносимый перечисленными явлениями, в разных районах Советского Союза неодинаков. Многие носят местный характер, отдельные явления, например пыльные бури, вымокание, наблюдаются в разные сезоны. Поэтому разделение их по сезонам весьма условно.

### § 1. ЗАСУХИ И СУХОВЕИ

#### Засухи, их влияние на растения. Типы засух

Засухи и суховеи — опасные метеорологические явления, влиянию которых подвержено 42% всей суши Земли.

Засуха — метеорологическое явление, представляющее собой сочетание недостатка или отсутствия осадков и грунтового подтока воды с высокой испаряемостью, приводящее к резкому несоответствию между поступлением воды из почвы и потребностью растений во влаге, в результате чего при той же агротехнике снижается урожай. Это несоответствие может возникнуть по разным причинам, определяющим наступление засух разных типов.

Различают засухи атмосферные, почвенные, комбинированные и физиологические.

Атмосферная засуха возникает при длительном отсутствии осадков и высокой испаряемости. При этом, если запас продуктивной влаги в почве значителен, то растения мало страдают от засухи, так как транспирация протекает нормально, но высокая температура воздуха, увеличивая в дневные часы диссимиляцию, существенно тормозит рост листьев и побегов. Повреждение отдельных частей растения наступает в том случае, когда температура воздуха достигает критических значений.

Почвенная засуха определяется малым запасом продуктивной влаги в начале периода вегетации, отсутствием грунтового питания растений и бездождем. В этих условиях, даже при сравнительно невысокой испаряемости, в клетках растений возникает дефицит влаги, приводящий к существенному нарушению их жизнедеятельности. Почвенная засуха в любые фазы развития приводит к значительному снижению урожая; особенно сильное влияние на урожай она оказывает, если наступает в критический период (у зерновых культур в фазу кущения — колошение).

Комбинированная засуха (атмосферно-почвенная) представляет собой сочетание первых двух типов засух. Обычно она начинается атмосферной засухой, а затем, когда в результате высокой испаряемости почвы теряет влагу, наступает засуха почвенная. В этом случае наносимый ею ущерб особенно велик. На территории СССР все сильные засухи последнего тридцатилетия (1946, 1959, 1963, 1964, 1968, 1972 гг.) были комбинированными.

При длительной атмосферно-почвенной засухе в клетках растений совершаются необратимые процессы, исчезает крахмал, усиливается распад белковых веществ, сокращаются процессы роста. Задержка в росте растений наблюдается даже после выпадения осадков или восстановления водоснабжения вследствие орошения.

Физиологическая засуха возникает под влиянием биологических особенностей растительного покрова или его состояния, когда растения при наличии воды в почве не могут полностью обеспечить себя влагой. Это бывает при повреждении корневой системы, слабом ее развитии и т. д.

Степень снижения урожая сельскохозяйственных культур зависит от времени наступления засух, их продолжительности, состояния растений, уровня агротехники.

Существует понятие особо опасной засухи. Это такое агрометеорологическое явление, при котором в течение 10 и более дней сохраняется относительная влажность воздуха  $\leq 30\%$  при запасах продуктивной влаги в пахотном слое (0—20 см) менее 10 мм, что вызывает повреждение растений на 1/3 и более посевной площади области, края, республики. Например, по данным А. И. Руденко, при средней засухе осадки за период всходы — колошение составляют 69—93% от средней многолетней суммы, при сильной — 62—70%, очень сильной — 40—50%.

С помощью указанных критериев трудно установить период начала засухи, так как при одной и той же сумме осадков, но разной степени испаряемости, влагообеспеченность растений может быть различной. Поэтому в качестве критериев засух часто используют сочетания элементов водного баланса корнеобитаемого слоя (обычно сумм осадков и запасов продуктивной влаги в почве) и испаряемости. Такими критериями являются коэффициенты увлажнения:

1. Гидротермический коэффициент (ГТК) Г. Т. Селянинова:

$$\text{ГТК} = \frac{\Sigma x}{0,1 \Sigma t_{>10}^{\circ}}, \quad (68)$$

где  $\Sigma x$  — сумма осадков (мм) за вегетационный период;  $\Sigma t_{>10}^{\circ}$  — сумма температур выше  $10^{\circ}$ .

А. М. Алпатьев и Н. Г. Грибкова установили следующие градации ГТК, соответствующие разной интенсивности засух:

Засуха	ГТК	Снижение урожая, %
слабая . . . . .	0,6—1,0	25
средняя . . . . .	0,4—0,6	25—50
сильная . . . . .	<0,4	>50

2. Н. В. Бова усовершенствовал ГТК Селянинова, включив в формулу первоначальный запас продуктивной влаги:

$$K = \frac{\omega + \Sigma x}{0,1 \Sigma t}, \quad (69)$$

где  $\omega$  — запас продуктивной влаги в корнеобитаемом слое (0—100 см) весной;  $\Sigma x$  — количество осадков, выпавших с момента весеннего определения влажности почвы до наступления засух;  $\Sigma t$  — сумма положительных среднесуточных температур от даты перехода температуры через  $0^{\circ}$  С.

Согласно выводам автора, засуха наступает, когда  $K=1,5$ . Поскольку в начальный период жизни корневая система растений развита слабо и расположена в верхнем слое толщиной 0,20 см, то включение в расчетную формулу запаса продуктивной влаги в метровом слое создает видимость избыточного увлажнения. Чтобы этого не было, Н. В. Бова рекомендует при расчете использовать запас продуктивной влаги в метровом слое не полностью, а брать от него 66%.

3. По мнению многих исследователей, наиболее объективным показателем засухи является дефицит испарения (иногда его называют дефицитом транспирации):

$$\Delta E = E_0 - E, \quad (70)$$

где  $E_0$  — испаряемость;  $E$  — фактическое испарение.

По данным Д. Л. Лайхтмана и Н. П. Русина, засуха наступает, если  $\Delta E > 3$  мм/сут.

Для оценки вероятности начала засухи на полях с конкретной культурой целесообразно вместо испаряемости в формулу (70) включать суммарное испарение при оптимальной влажности почвы. А. Р. Константинов предложил принять дефицит испарения в качестве критерия засухи, включив в него скорость ветра, играющую большую роль в процессе высушивания растений:

$$\frac{\Delta E}{u} = \frac{E_0 - E}{u}, \quad (71)$$

где  $u$  — фактическая скорость ветра;  $\frac{\Delta E}{u}$  — дефицит испарения, рассчитанный на единицу скорости.

4. Объективным критерием приемлемости засухи является запас продуктивной влаги в почве. Засуха наступает в том случае, когда этот запас близок к влажности завядания. Предвычисляя ход запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое в летний период, можно определить дату наступления почвенной засухи. А. С. Утешев установил, что по своей природе критерии засухи динамичны, т. е. не остаются постоянными в течение вегетационного периода. Вместе с развитием растений, меняется их отношение к влаге, а следовательно, должны изменяться и критерии засухи.

Засухи бывают весенние, летние, осенние, а иногда они охватывают все три сезона и продолжаются до поздней осени, захватывая весь вегетационный период.

При весенней засухе наблюдается низкая влажность воздуха, сравнительно невысокая температура и холодный сильный ветер. Это холодная засуха, которая часто сопровождается пыльной бурей. Особенно опасна весенняя засуха в районах, где осенью и зимой запасы продуктивной влаги в корнеобитаемом слое были небольшими и растения развиты плохо. В этом случае наблюдается сильное выдувание растений и посевы оказываются очень изреженными.

При летней засухе наблюдается высокая температура воздуха, обычно на несколько градусов превышающая средние многолетние значения, и низкая относительная влажность. Сочетание этих метеорологических элементов определяет высокую испаряемость. Даже при сравнительно больших запасах влаги в дневные часы наступает разрыв между влагопотреблением и влагопотребностью, отчего снижается питание растений, замедляется их рост — и все это приводит к заметному снижению урожая. Интенсивные летние засухи существенно сказываются и на урожае многолетних культур следующего года, так как при этом слабо протекает закладка плодовых почек.

Осенние засухи наступают в периоды после уборки зерновых и окончания вегетации пропашных культур. Поэтому они

главным образом сказываются на состоянии озимых и многолетних культур. При почвенной осенней засухе формируются слабые всходы и растения уходят на зиму плохо сформировавшимися и не накопившими достаточного для зимовки количества органических веществ. Такие растения плохо зимуют и часто весной посевы оказываются сильно изреженными. Степень опасности засух в большой степени зависит от засухоустойчивости вида и сорта растений. Действию засух наиболее подвержены яровые культуры, которые активно растут и развиваются в начале лета, когда запасы влаги в почве уже невелики. Озимые, как правило, страдают от засух в меньшей мере, поскольку они лучше обеспечены влагой за счет использования ее запасов, образовавшихся после таяния снежного покрова.

### Продолжительность, повторяемость засух в районах их распространения в СССР

По данным А. И. Руденко, засухи на территории СССР в среднем по межфазным периодам имеют следующую повторяемость

	Процент засух
Посев — восковая спелость яровых хлебов . . . . .	32
Посев — молочная спелость . . . . .	45
Начало кущения — молочная спелость . . . . .	9
Другие периоды . . . . .	14

Следовательно, 86% засух совпадают с критическим периодом по отношению к влаге у зерновых культур, с чем и связан огромный ущерб, наносимый урожаю.

Продолжительные засухи отличаются наибольшей интенсивностью (табл. 17).

Таблица 17

Повторяемость засух разной интенсивности по периодам вегетации, %

Интенсивность засух	Посев — молочная спелость	Посев — восковая спелость	Кущение — молочная спелость	Разные периоды
Очень сильная	13	10	1	2
Сильная	14	13	3	7
Средняя	12	5	5	15

В СССР более 70% площади пахотных земель подвержены влиянию засухи. На рис. 25 показана вероятность засух (%), вы-

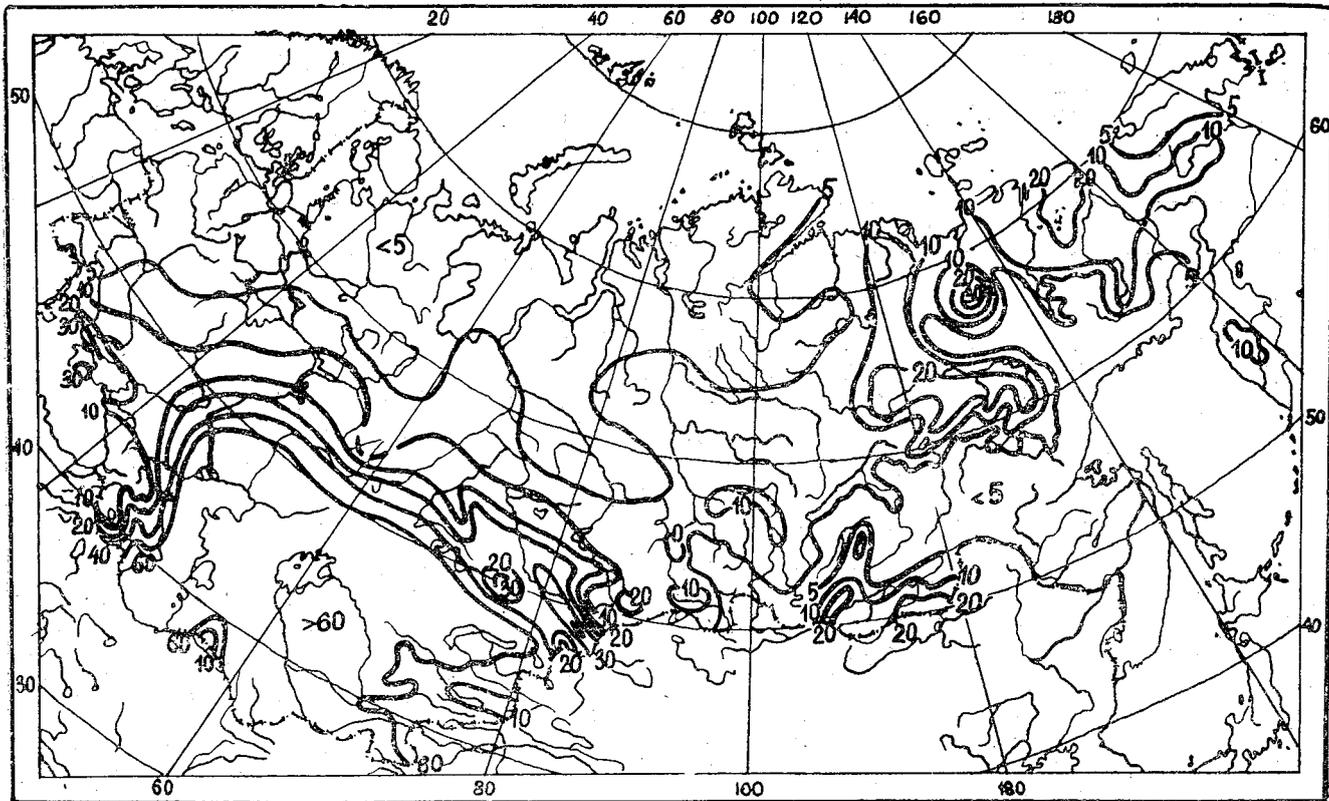


Рис. 25. Вероятность засух (%).

численная В. А. Смирновым по повторяемости значений ГТК, взятого в качестве критерия засухи. При рассмотрении карты может сложиться неправильное мнение о том, что в республиках Средней Азии максимальная повторяемость засух. В действительности же этот район Советского Союза отличается постоянной сухостью климата, поэтому засуха как необычайное неблагоприятное явление, нарушающее нормальный режим погоды, здесь не наблюдается.

### Влияние суховея на растения

Суховой — комплексное метеорологическое явление, характеризующееся низкой влажностью воздуха, сравнительно высокой температурой, сильным ветром, которые в результате повышенных транспирации и испарения с поверхности почвы вызывают нарушение водного баланса растений. Влияние суховея на растения состоит в следующем. Если влажность почвы высокая, то сухой горячий сильный ветер увеличивает испарение с полей, которое вначале близко к испаряемости, и запасы влаги в почве быстро истощаются. Влагопотребление становится значительно меньше влагопотребности, что вызывает нарушение водного баланса растений, в результате наступает «захват» (повреждение растений от обезвоживания тканей) и «запал» (повреждение от перегрева). Это приводит к нарушению процесса питания растений, усилению дыхания, сокращению энергии роста. Листья быстро увядают. При температуре воздуха 35—37°С у многих растений устьичный аппарат перестает регулировать испарение, что значительно ускоряет высыхание растений. Если в момент наступления суховея запасы влаги в почве малы, то повреждение наступает раньше и процесс выражен наиболее резко. При длительном сильном суховее нарушается суточный ход метеорологических элементов. Вследствие сильного перемешивания в приземном слое ночью отсутствует четко выраженный минимум температуры и максимум относительной влажности воздуха.

Растения, подвергшиеся действию суховея днем, не отдыхают от него ночью, в клетках не ликвидируется дефицит влаги и не восстанавливается тургор. Поэтому сухой, действующий в течение нескольких суток подряд, способен нанести огромный ущерб сельскому хозяйству. Наиболее сильно при суховея повреждаются растущие части растений, цветы и, как итог, появляется чреззерница колоса и щуплость зерна. Особенно опасны суховея в период налива и созревания зерна, когда сильный ветер вызывает его осыпание.

Объективным признаком суховея, так же как и засухи, является дефицит испарения. Но ввиду отсутствия материалов по дефициту испарения для установления критериев суховея часто используют метеорологические элементы, влияющие на него. И. Е. Бучинский, Н. С. Темникова, Д. Л. Лайхтман в качестве его критерия

используют сочетания метеоэлементов, при которых относительная влажность воздуха в метеорологической будке  $\leq 30\%$ , температура воздуха  $\geq 25^\circ\text{C}$  и скорость ветра на высоте флюгера  $> 5$  м/с.

Большинство критериев суховеев, как и засух, определены по реакции на них растений. Однако в разных географических районах реакция одного и того же вида растений различна в зависимости от почвенных факторов, уровня агротехники, особенностей сорта и т. д. Поэтому критерии суховеев, полученные на основании объективных данных, например для Украины и Казахстана, заметно отличаются. Эксперименты, выполненные под руководством Е. А. Цубербиллер, показали, что разные культуры повреждаются при неодинаковых сочетаниях температуры, относительной влажности и скорости ветра.

### Продолжительность, повторяемость суховеев и районы их распространения

Продолжительность суховеев меняется в широких пределах — от одного дня до нескольких недель. В табл. 18 приведены данные Н. С. Темниковой о максимальной продолжительности суховеев на юго-востоке ЕТС.

Таблица 18

#### Максимальная продолжительность суховейного периода, дни

Станция	Месяц					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Элиста	6	11	14	9	16	10
Грозный	7	9	5	13	3	1
Прохладная	5	6	3	5	4	1
Дивное	11	29	15	18	18	9
Ростов-на-Дону	8	12	3	15	13	3
Волгоград	8	17	12	9	10	—
Эльтон	8	8	7	13	18	12

Чем продолжительнее суховей, тем сильнее он воздействует на посевы. Вероятность наступления суховеев в разные месяцы летнего периода на юге и юго-востоке ЕТС приблизительно одинакова, незначительное увеличение их повторяемости наблюдается в июле—августе.

Изучению распространения суховеев на территории СССР посвящены работы Е. А. Цубербиллер, Н. С. Темниковой, И. Е. Бучинского. Установлено, что среднее многолетнее число дней с суховеями на ЕТС меняется в широких пределах (рис. 26). Максимальное число таких дней наблюдается в Нижнем Поволжье и Прикаспии. В поймах рек Волги и Днепра вследствие возрастания относительной влажности воздуха повторяемость суховеев уменьшается. Большую роль в проявлении суховеев играет рельеф места. Например, наблюдаемое увеличение числа дней с суховеями в Воронеже объясняется своеобразием рельефа, т. е. коридором вдоль реки Луга между отрогами Донецкого кряжа.

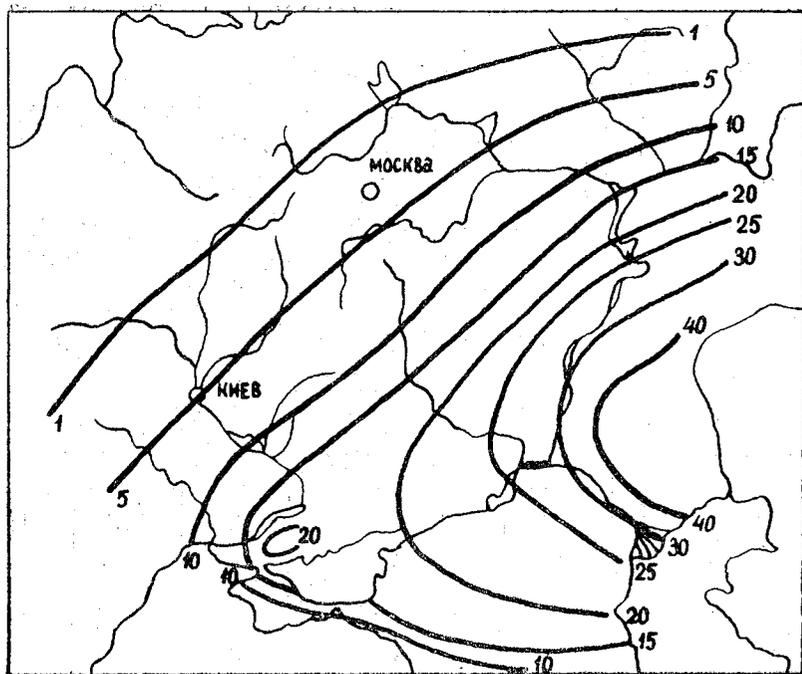


Рис. 26. Среднее многолетнее число дней с суховеями.

### Причины возникновения засух и суховеев на территории СССР

В ранних исследованиях, посвященных засухам, их появление на ЕТС объяснялось «дыханием пустынь», т. е. вторжением сухого горячего воздуха с территории Средней Азии. В настоящее время доказано, что поступление на ЕТС горячего воздуха из пустынных районов Средней Азии наблюдается крайне редко. Наоборот, при засухах на ЕТС и в Северном Казахстане, над республиками

Средней Азии обычно располагается зона пониженного атмосферного давления и часто проходит планетарная высотная фронтальная зона (ПВФЗ), а в более северных районах наблюдается стационарный антициклон. Вследствие такой структуры барического поля воздух не может поступать с территории среднеазиатских пустынь на юг ЕТС или в Северный Казахстан.

В соответствии с работами М. Х. Байдала процессы, приводящие к возникновению засух, можно разделить на два типа.

Тип первый. Возникновению засух предшествуют вторжения арктического воздуха с севера или с северо-запада (с акваторий Баренцева и Карского морей) и формирование за холодным фронтом мощного антициклона. Арктический воздух отличается низкой температурой и малым влагосодержанием. Перемещаясь к югу на территорию Сибири или ЕТС, он прогревается и несколько увлажняется в результате испарения с поверхности почвы и растительного покрова. Однако процесс прогревания воздуха протекает более интенсивно, чем повышение абсолютной влажности, так как при антициклональном типе погоды, малой облачности, высокой прозрачности арктического воздуха велик радиационный нагрев деятельной поверхности. В результате этого при движении антициклона на юг происходит быстрый рост дефицита упругости водяного пара. Увеличению дефицита упругости способствуют нисходящие движения в центральных районах антициклона, вызывающие некоторое нагревание воздуха.

В зависимости от того, на какую территорию перемещается арктическая воздушная масса, М. Х. Байдал выделил два вида процессов. Если арктический воздух с Карского моря поступает на территорию Западной Сибири (рис. 27), стационарный антициклон формируется над центральными и восточными районами Казахстана. ЕТС и западные районы Казахстана в это время подвержены действию циклонов. Следовательно, в данной ситуации атмосферная засуха наблюдается над восточным Казахстаном (при ветрах южного и юго-восточного направлений) и югом Западной Сибири (при ветрах южного и юго-западного направлений).

В том случае, когда арктический воздух вторгается с акватории Баренцева моря на ЕТС, центр стационарного антициклона располагается над Поволжьем или над Уралом (рис. 28). На ЕТС наблюдается засуха с преобладанием юго-восточного ветра. В центральном и восточном Казахстане в это время циклонический тип погоды. Географическая разобщенность атмосферных засух при арктических вторжениях проявляется довольно четко. Засухе на ЕТС обычно соответствует аномально влажная или близкая к норме погода над Казахстаном.

Тип второй. Засушливая погода на ЕТС и в Казахстане может определяться воздействием антициклонов азорского происхождения, перемещающихся с запада на восток (рис. 29).

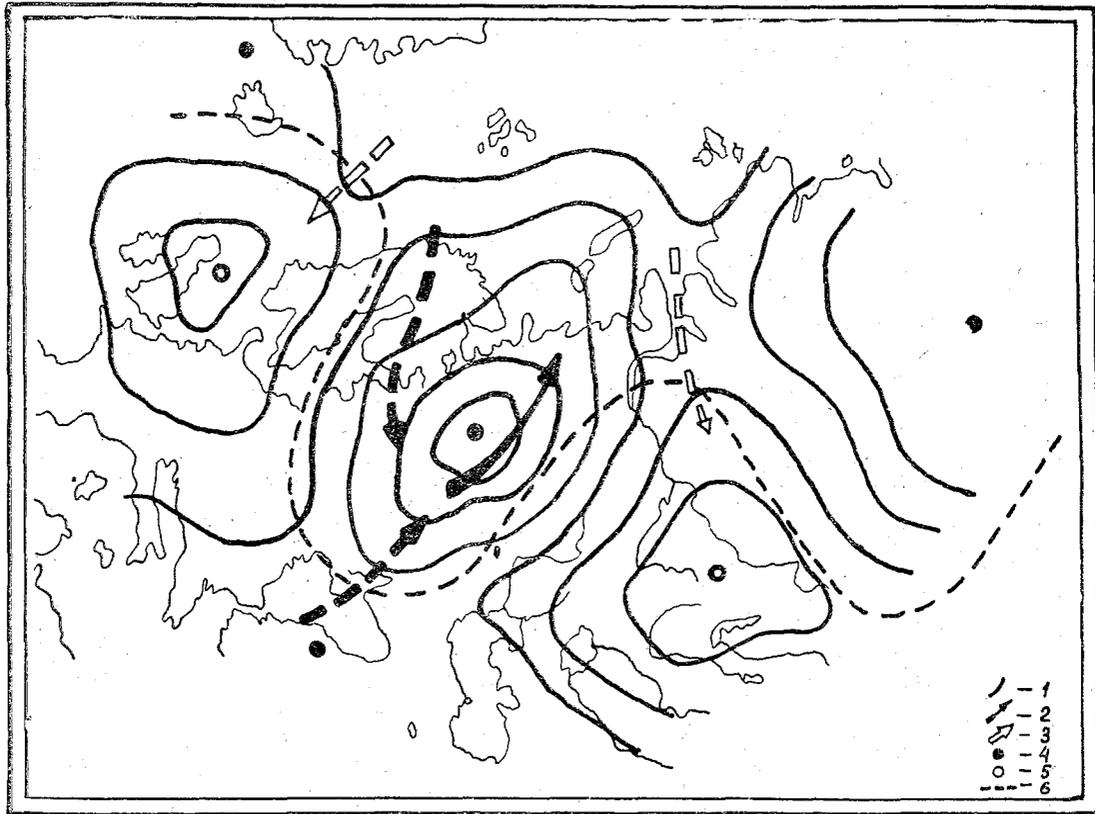


Рис. 27. Схема процессов возникновения засух на АТС:

1—наземные изобары; 2—траектории циклонов; 3—траектории антициклонов; 4—центральные циклоны; 5—центральные антициклоны; 6—ПВФЗ

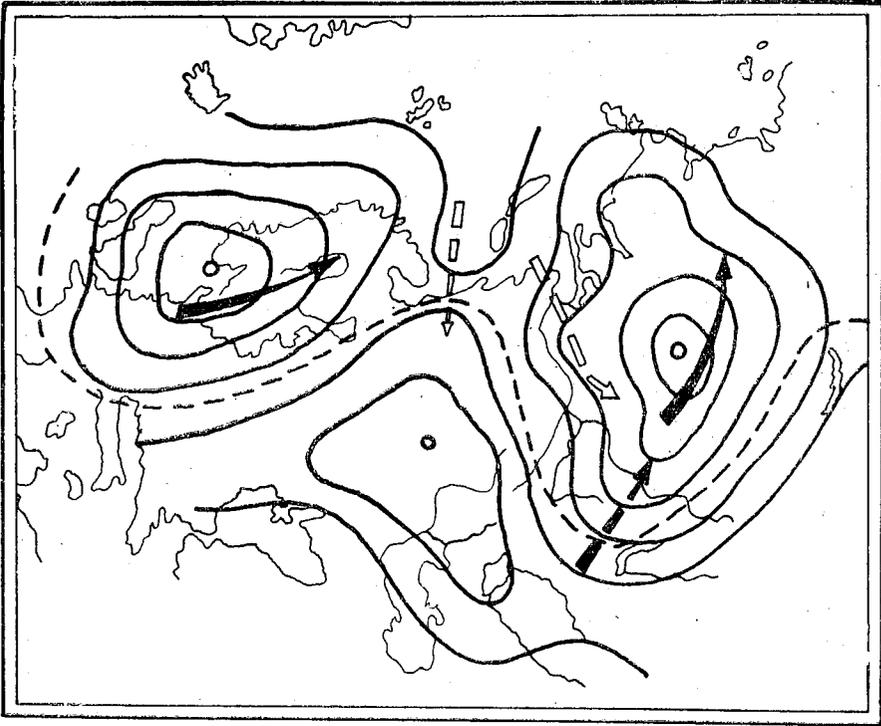


Рис. 28. Схема процессов возникновения засух на ЕТС.  
Условные обозначения см. рис. 27.

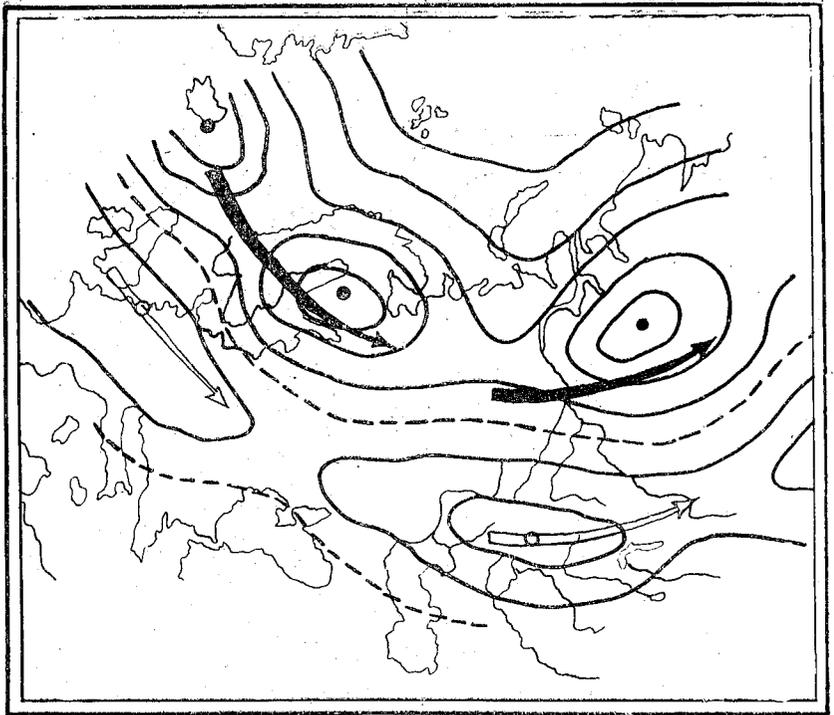


Рис. 29. Синоптическая ситуация возникновения засух при вторжении ядер азорского происхождения.  
Условные обозначения см. рис. 27

Создается полоса высокого давления, охватывающая одновременно южные районы ЕТС и АТС. Севернее и южнее этой полосы устанавливается циклонический тип погоды.

### Меры борьбы с засухами и суховеями и их агрометеорологическая эффективность

В СССР разработана система мероприятий по борьбе с засухами и суховеями. Она включает селекционно-генетическое, агротехническое и лесомелиоративное направления.

1. Селекционно-генетическое направление в основном базируется на выведении новых засухоустойчивых сортов. В СССР такие работы проводятся на 27 селекционных станциях. Заслуженное признание в засушливых районах СССР получили новые сорта пшеницы — Мироновская-808, Безостая, Аврора, Кавказ и другие, дающие сравнительно высокие урожаи при слабых и средних засухах.

2. Комплексные агротехнические мероприятия по накоплению и сохранению влаги на полях. Широкое распространение получили следующие:

а) Ранняя зяблевая вспашка, рыхление междурядий пропашных культур с целью разрушения почвенных капилляров, по которым происходит подъем капиллярной влаги, и уменьшение испарения с полей. М. И. Львович показал, что ранняя зяблевая вспашка способствует также сокращению поверхностного стока, который в районе сухих степей весной уменьшается в 5 раз, в степных районах — в 3—4, а в лесостепных — в 2 раза.

б) Безотвальная вспашка, предложенная Т. С. Мальцевым. При таком способе обработки почвы пласт ее не переворачивается, что ведет к сохранению влаги в пахотном горизонте. Оставшаяся на поверхности стерня уменьшает диффузию влаги из почвы, тем самым значительно снижается произвольное испарение.

в) Парование полей, позволяющее сохранить влагу на полях в летний период. Ф. Ф. Давитая отметил, что наибольший результат чистый пар дает в зонах со значительной годовой суммой осадков. В сухих степях этот прием земледелия малоэффективен.

г) Снегозадержание и снегопахота, являющиеся эффективным средством накопления влаги на полях. Снегозадержание целесообразно в районах, где снежный покров высок и к концу зимы составляет не менее 20 см, иначе эффект будет очень мал. Его проводят путем расстановки щитов, организацией кулис, с помощью полос стерни и т. д. В результате снегопахоты создаются плотные снежные валы высотой 40—60 см. Они располагаются перпендикулярно преобладающему направлению ветра на расстоянии 10—15 м друг от друга. Пространства между ними заполняются сне-

гом при последующих снегопадах, в результате чего создается достаточно равномерный снежный покров.

д) Географическая разобщенность посевов. Как отмечалось ранее, засухи на ЕТС и АТС одновременно наблюдаются крайне редко. Поэтому целесообразно посеять одной и той же культуры иметь в разных районах, чтобы при засухе на одной территории получить высокий урожай на другой.

3. Полезащитное лесоразведение. Влияние лесных полос на микроклимат полей состоит в следующем. Являясь преградой воздушному потоку, лесные полосы дробят его, уменьшают скорость ветра и интенсивность турбулентного обмена. Уменьшение скорости ветра наблюдается с приближением к лесной полосе на расстоянии, равном ее 15-кратной высоте, причем наибольшее уменьшение его скорости наблюдается непосредственно за лесной полосой, на расстоянии, равном ее 5-кратной высоте. Детальное исследование агрометеорологической эффективности лесных полос провели А. Р. Константинов и Л. Р. Струзер, установив, что летом уменьшение скорости ветра приводит к снижению испаряемости и сохранению запасов почвенной влаги. Зимой лесная полоса способствует сохранению и накоплению снежного покрова в межполосной зоне, уменьшению стока. В итоге весенние запасы влаги в почве возрастают на 10—15%.

Вследствие уменьшения интенсивности турбулентного обмена за лесной полосой температура воздуха повышается, но в результате увеличения суммарного испарения за счет больших запасов продуктивной влаги в почве температура деятельной поверхности и воздуха должна понижаться. Поэтому в первой половине вегетационного периода, когда обычно влагозапасы почвы на полях среди лесных полос больше, чем в открытой степи, температура воздуха снижается. В конце вегетационного периода, когда влагозапасы почвы малы и в степи и на полях среди лесных полос, последние способствуют повышению температуры. Относительная влажность воздуха под их влиянием повышается на 10—12%. Установлено, что лесные полосы при правильном выборе конструкции — одно из самых действенных мероприятий по борьбе с засухами и суховеями.

4. Орошение является наиболее эффективным приемом в борьбе с засухой. В Советском Союзе орошаемое земледелие в основном сосредоточено в пустынных и полупустынных районах республик Средней Азии, в Молдавии, на юге Украины, в Закавказье, Нижнем Поволжье, Алтайском и Приморском краях. С каждым годом растут площади орошаемого земледелия, особенно в степных районах. Оросительные мероприятия требуют четкого планирования, состоящего в расчетах норм орошения, норм и сроков полива. Методика этих расчетов изложена в гл. V. В результате орошения вид кривой, характеризующей изменение запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое, существенно отличен от

того, который наблюдается на неорошенном поле (рис. 30, 15). При четко организованном орошении запасы продуктивной влаги в почве бывают не выше полевой влагоемкости ( $\omega_0$ ) и не ниже 70% от нее.

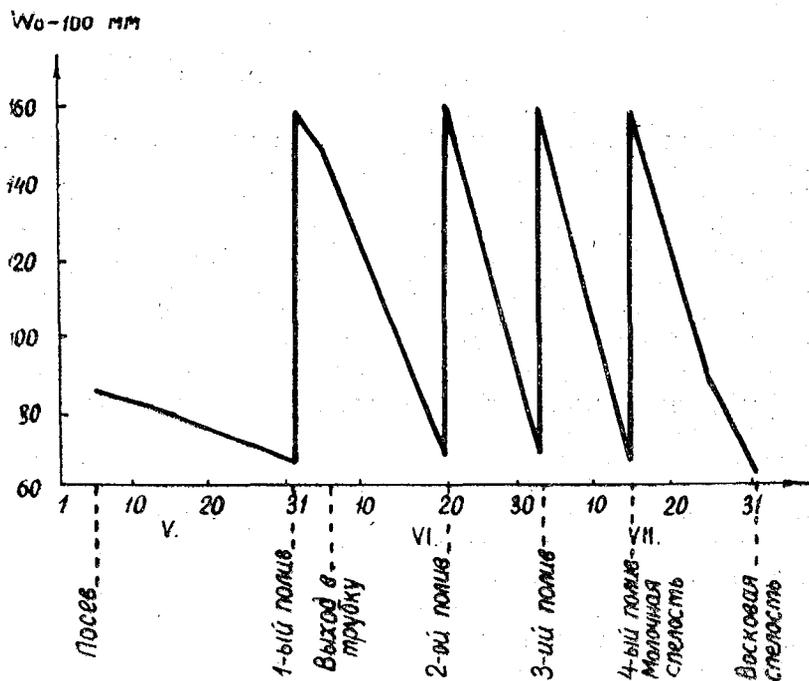


Рис. 30. Изменение запасов продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см при орошении яровой пшеницы. Станция Ключи Алтайского края.

## § 2. ПЫЛЬНЫЕ БУРИ. ВЫДУВАНИЕ ПОСЕВОВ

### Механизм возникновения пыльных бурь и их влияние на растения

Под пыльной бурей понимают такое явление, когда при сильном ветре в воздух поднимается много песка, пыли, частиц сухой земли, вследствие чего происходит значительное уменьшение видимости. В зависимости от количества пыли в воздухе и замутнения атмосферы различают слабые пыльные бури с видимостью 2—10 км, средние — 1—2 км и сильные — менее 1 км. Характер пылевых частиц бывает различным. Чаще всего это песок, глина, чернозем. В связи с этим пылевое облако приобретает различную окраску; по цвету пылевых частиц иногда выделяют желтые, черные и другие бури. Пыльные бури наблюдаются в засушливых районах земного шара. Большая сухость и измельченность верх-

него слоя почвы, отсутствие мощного растительного покрова способствуют тому, что при сильном порывистом ветре почвенные частицы подхватываются ветровым потоком и переносятся на значительные расстояния.

Механизм возникновения пыльных бурь можно представить так. Сильный порывистый ветер способствует опусканию воздушных вихрей до земли, при этом возникают большие скорости у поверхности. В порах почвы на короткий промежуток времени повышается давление, которое в последующий момент, когда воздух начнет перемещаться из пор в атмосферу, вместе с горизонтальным потоком воздуха способствует отрыву почвенных частиц и их подъему. Мелкие частицы долгое время остаются во взвешенном состоянии, а более крупные выпадают и снова поднимаются, двигаясь по направлению ветра скачками. Ударяясь о неровности, эти частицы как бы бомбардируют почву. Если кинетическая энергия их велика, то создается дополнительная сила, способствующая отрыву почвенных частиц от основного слоя и переносу.

Ветровая эрозия почв начинается уже при скорости ветра 5—7 м/с, когда возникает едва заметное перемещение частиц почвы вдоль поверхности. При скорости ветра 7—10 м/с это перемещение становится весьма интенсивным, а при 15 м/с и выше транспортные способности воздушного потока возрастают настолько, что мелкие частицы почвы, оторвавшиеся от поверхности, остаются во взвешенном состоянии и переносятся воздушным потоком на большие расстояния.

Скорости ветра, при которых возникают пыльные бури, меняются также в зависимости от структуры почвы и размеров почвенных частиц. Например в Поволжье, где поверхностный слой состоит из мелких и легких частиц супесчаной почвы, пыльные бури возникают при скорости ветра 10—12 м/с, в пустынях Африки и Аравии для этого необходима скорость ветра 20—25 м/с, так как преобладает крупнозернистый песок.

Особо опасными пыльными бурями на территории СССР считаются бури продолжительностью  $\geq 12$  ч при скорости ветра  $\geq 15$  м/с, вызывающие повреждение сельскохозяйственных культур на 1/3 и более посевных площадей, а также пыльные бури, при которых видимость уменьшается до 50 м в течение более 3 ч.

Вследствие выдувания и переноса почвенных частиц на другие участки у растений обнажается узел кущения, что при большой сухости воздуха губительно отражается на их состоянии. Иногда растения поднимаются в воздух вместе с почвой. На полях разрушается верхний, плодородный слой, содержащий наибольшее количество питательных веществ. На восстановление этого слоя впоследствии уходят многие годы. На других участках пыль оседает, образуя иногда довольно высокий слой, закрывающий растения, нанося им повреждения механического характера и нарушая

газообмен. При наличии хорошо укрепившегося растительного покрова пыльные бури менее опасны, хотя в этом случае растения тоже могут быть засыпаны принесенной ветром землей.

Синоптические ситуации, при которых наблюдаются пыльные бури, можно разделить на два типа.

1. Фронтальные пыльные бури, возникающие при прохождении холодного фронта, вызванные усилением ветра на нем и в теплых секторах штормовых циклонов. В некоторых районах, например в Туркмении, этот тип бурь наиболее опасен. При фронтальной пыльной буре пылевое облако зарождается у земли, а затем поднимается до высоты 3—5 км. Оно смещается вместе с перемещением зоны холодного фронта (рис. 31).

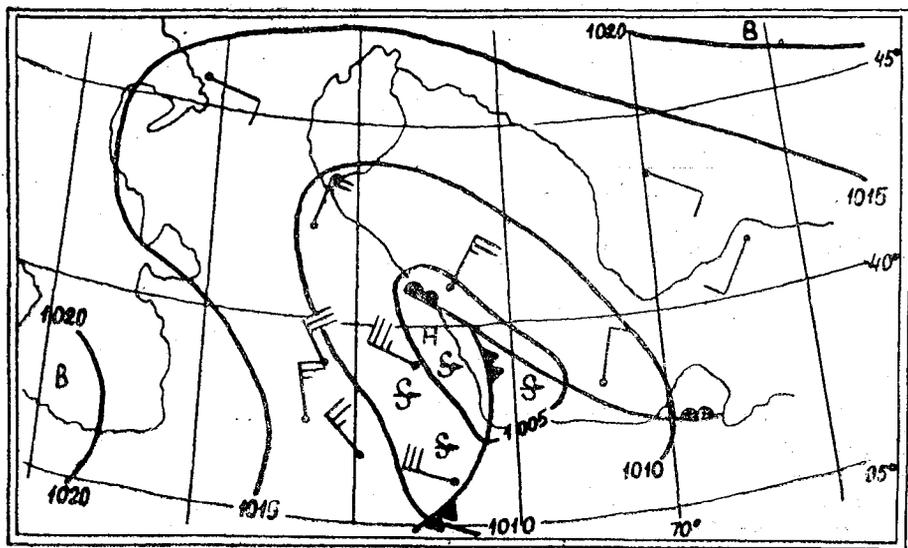


Рис. 31. Синоптические условия при фронтальной пыльной буре: 09 часов, 5/III 1952 г.

2. Внутримассовые пыльные бури, возникающие в штормовой зоне, которая образуется при встрече двух барических образований противоположного знака при условии резкого усиления одного из них (рис. 32). Эти бури носят стационарный характер, охватывают в основном нижнюю тропосферу.

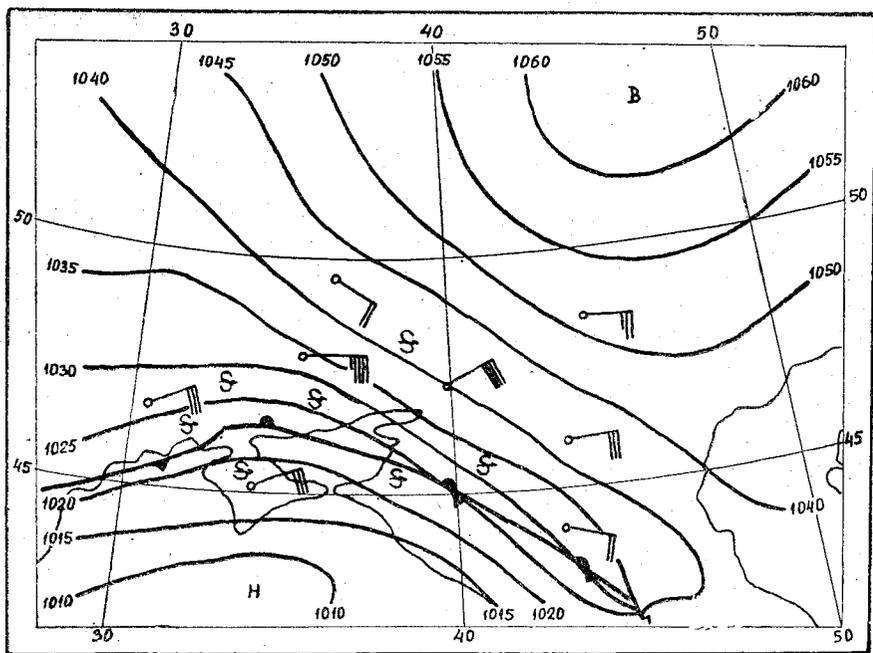


Рис. 32. Синоптические условия при внутримассовой пыльной буре; 15 часов, 4/1 1969 г.

### Районы распространения и повторяемость пыльных бурь

Пыльные бури наблюдаются во многих районах земного шара, преимущественно в степных, полупустынных и пустынных. На основании данных космических исследований в восточном полушарии установлено несколько очагов пыльных бурь: Центральная и Западная Африка, африканское Средиземноморье (Алжир, Марокко, Тунис, Египет), Восточная Африка (Судан) и Аравийский полуостров, Нижнее Поволжье и Северный Кавказ, Северный Казахстан и республики Средней Азии. Здесь пыльные бури наблюдаются наиболее часто и захватывают огромные территории.

В западном полушарии большая повторяемость пыльных бурь наблюдается в южных и юго-восточных штатах США. На территории СССР в отдельные годы пыльные бури отмечаются на Украине, в Центральночерноземной области. На рис. 33 показана схема повторяемости пыльных бурь за год и границы их распространения в СССР. Наибольшая повторяемость пыльных бурь (более 60 дней в году) — в Туркмении и нижнем течении реки Урал, в Северном Казахстане.

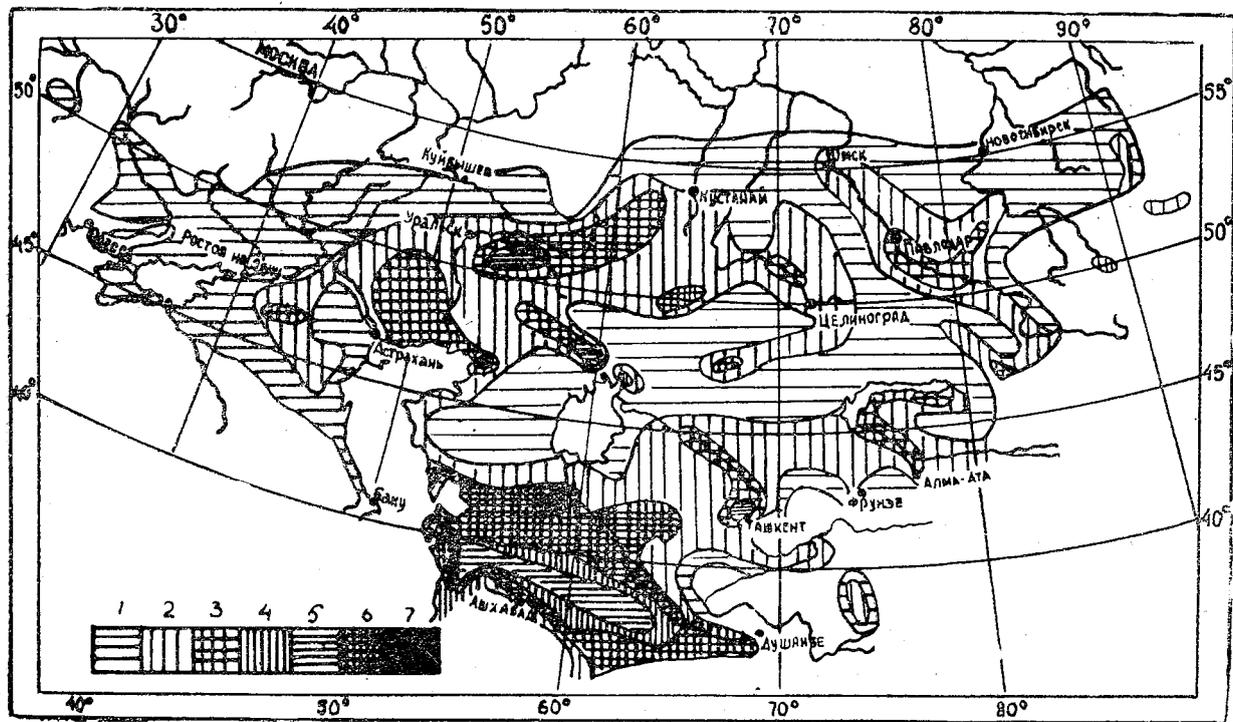


Рис. 33. Число дней в году с пыльными бурями:  
 1—1-10; 2—10-20; 3—20-30; 4—>30; 5—>40; 6—>60; 7—>80

Пыльные бури на территории СССР наблюдаются во все сезоны, но максимум их повторяемости приходится на летние месяцы. Суточный ход повторяемости пыльных бурь имеет четкий максимум в дневные часы. Обычно пылевое облако образуется в первой половине дня, достигает максимальной интенсивности к полудню и рассеивается к вечеру. Ночные пыльные бури наблюдаются редко, что связано с особенностями суточного хода скорости ветра, а также с большей влажностью поверхностных слоев почвы ночью.

Зимние пыльные бури бывают нечасто, но они более продолжительны и охватывают значительную территорию. Это определяется большой стационарностью процессов зимой, а также отсутствием растительного покрова.

Продолжительность пыльных бурь различна — от 2—3 до 50—60 ч. Одна из наиболее сильных пыльных бурь, наблюдавшаяся в январе—феврале 1969 г. на территории Ставропольского и Краснодарского краев, Волгоградской, Донецкой, Запорожской, Николаевской и Днепропетровской областей, длилась в разных районах от 30—70 ч до 5—7 сут (см. рис. 32).

Число дней с пыльными бурями в целом по земному шару от года к году постепенно возрастает и вред, наносимый ими, увеличивается. Причиной этого являются главным образом антропогенные факторы: распахивание целины, уничтожение сухих пастбищ, парование полей, сведение лесов и т. д. Эти мероприятия приводят к тому, что почва становится более подверженной выдуванию при тех же самых скоростях ветра.

### **Методы борьбы с пыльными бурями**

Почва не является простой смесью отдельных агрегатов, а представляет собой комплексный механизм, в котором агрегаты соединяются органическими фракциями в обособленные структурные элементы. Их наличие и обеспечивает почве главное ее достоинство — плодородие. Прочность структурных элементов зависит от количества связывающих веществ и влажности почвы. Прочность тяжелых глинистых почв больше, легких супесчаных — меньше. У бедных гумусом легких сухих почв она минимальна, при механическом воздействии на них структурные образования распадаются. В связи с ростом механизации сельскохозяйственных работ нагрузка на единицу площади поля возросла. В условиях достаточного увлажнения эти нагрузки не наносят ущерба структуре почвы. Но структура легких почв степных и полупустынных районов при обработке быстро разрушается, почва превращается в мелкие разрозненные частицы. В этих районах вместе с ростом механизации полевых работ увеличивается число пыльных бурь.

Для борьбы с эрозией почв и пыльными бурями разработана система агротехнических мероприятий, целью которых является

закрепление верхнего слоя почвы. Следует отметить следующие мероприятия.

1. Безотвальная вспашка, обеспечивающая необходимое рыхление почвы и оставляющая почти нетронутой ее поверхность вместе с остатками стерни. Сохранившаяся стерня уменьшает выдувание почвы, способствует накоплению снега на полях, что ведет к повышению урожайности.

2. Полосное размещение посевов и черных паров. Пары, целью которых является накопление влаги на полях, располагаются между засеянными участками полосами (шириной не более 100—150 м) перпендикулярно преобладающему направлению ветра. В результате начавшиеся на оголенной почве эрозионные процессы гасятся в следующей полосе растительным покровом.

3. Специальные почвозащитные севообороты в районах с легкими почвами, предусматривающие посевы многолетних трав, садов, кустарников на возвышенных местах и ветроопасных склонах.

4. Кулисные посевы, являющиеся хорошим ветрозащитным средством. Кулисы, защищая черные пары от выдувания, способствуют также сохранению влаги на полях, а зимой — снегонакоплению.

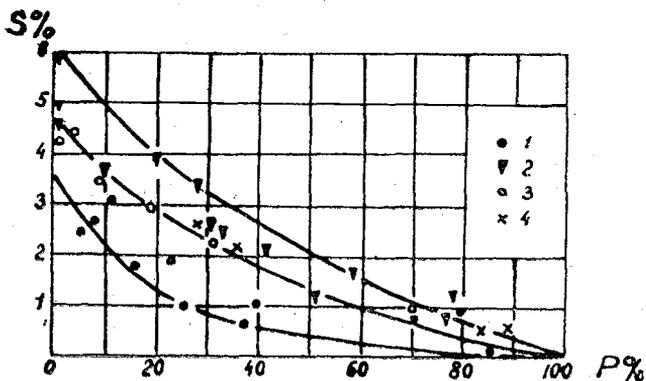


Рис. 34. Вероятность повреждения озимых культур пыльными бурями (P) при разной доле площади, занятой лесными полосами (S):

1—по Д. П. Рыжову; 2—по П. С. Захарову; 3—по А. А. Сенкевичу; 4—по Л. Е. Анапольской и Д. П. Беспалову

5. Полезащитные лесные полосы, дающие наибольший эффект в борьбе с пыльными бурями. На рис. 34 показана связь площади поврежденных посевов с долей площади, занятой лесными полосами. Если площадь этих полос составит 4—5% от общей площади посевов, то повреждение озимых пыльными бурями может быть полностью исключено. Наибольший эффект лесные полосы дают в сочетании с агротехническими приемами, изложенными пунктах 1—3.

6. Другие методы активной борьбы с ветровой эрозией почв, используемые в настоящее время, например покрытие поверхности почвы слоем эмульсии, которая обволакивает и склеивает частицы поверхностного слоя, вследствие чего ветровая эрозия почв сокращается.

### § 3. ГРАД

#### Влияние града на посевы. Метеорологические условия образования града

Град — одно из опаснейших атмосферных явлений, наносящих значительный ущерб сельскому хозяйству. Под градом понимают твердые осадки, выпадающие в виде ледяных частиц при сильных грозах. Диаметр градин чаще всего составляет 5—50 мм. Однако в умеренных широтах наблюдались градины массой до 1 кг, а на полуострове Индостан — до 3 кг. Падая с большой скоростью, составляющей иногда 50—100 м/с, они приобретают большую разрушительную силу. От ударов градин, особенно крупных, погибают посевы однолетних культур, уничтожаются бахчевые культуры, повреждаются кусты, плодовые деревья, виноградная лоза. От града страдают домашние животные, повреждаются здания. Выпадение града обычно сопровождается ливневыми осадками и нередко сильными ветрами, что усугубляет его отрицательное действие, так как вместе они разрушают верхний, наиболее плодородный слой почвы и способствуют смыву его ливневыми потоками. Поэтому результаты сильного градобития могут сказываться на урожае последующих лет.

Степень повреждения посевов градом зависит от многих причин, в том числе от фазы развития растений. Однолетние культуры, поврежденные градом в начале развития, могут в дальнейшем отрастать. Град в период цветения и созревания культур уничтожает отдельные органы растений, которые уже не восстанавливаются.

Ежегодно на земном шаре от градобития страдают посевы на больших площадях: в районах с интенсивным выпадением града уничтожается до 1% посевов. По данным Госстраха СССР, только в Молдавской ССР ежегодно повреждается около 3% посевов однолетних культур и многолетних насаждений.

Физические процессы образования града изучены еще недостаточно. Детально они рассматриваются в курсе общей метеорологии. Обычно град связан с прохождением холодных фронтов фронтов окклюзии, наблюдается при сильной внутримассовой термической конвекции. Эти процессы способствуют образованию мощных кучевообразных облаков. В районах сравнительно частого выпадения града велика роль рельефа, способствующего развитию динамической конвекции. По данным В. П. Пастуха и Р. Ф. Сохриной, в районе Заиллийского Алатау (табл. 19) наиболее резко с высотой возрастает число дней с градом до высот 2000—2500 м

## Изменение числа дней с градом по склону Заильского Алатау

Станция	Высота над уровнем моря, м	Разность высот, м	Число дней с градом за год	Увеличение числа дней с градом
Алмá-Атá	825	—	1,5	—
Медео	1529	704	2,9	1,4
Верхний Горельник	2254	1429	8,7	7,2
Мын-Джилки	3036	2211	10,8	9,3

Выпавший град образует на поверхности земли градовую дорожку, т. е. узкую полосу, вытянутую в направлении перемещения градового облака. Средняя протяженность градовых дорожек, по данным разных авторов, 15—20 км, но отмечались случаи, когда длина дорожки составляла 300—400 км и более. Средняя ширина градовой дорожки примерно 5—7 км, иногда достигает 20—50 км. Наибольшая интенсивность градобития отмечается в центральной части градовой дорожки, где наблюдаются и наибольшие суммы осадков. На рис. 35 показана зона выпадения града во Франции 30 августа 1951 г. Как видно из рисунка, размер градовой дорожки значительно превышает средние значения.

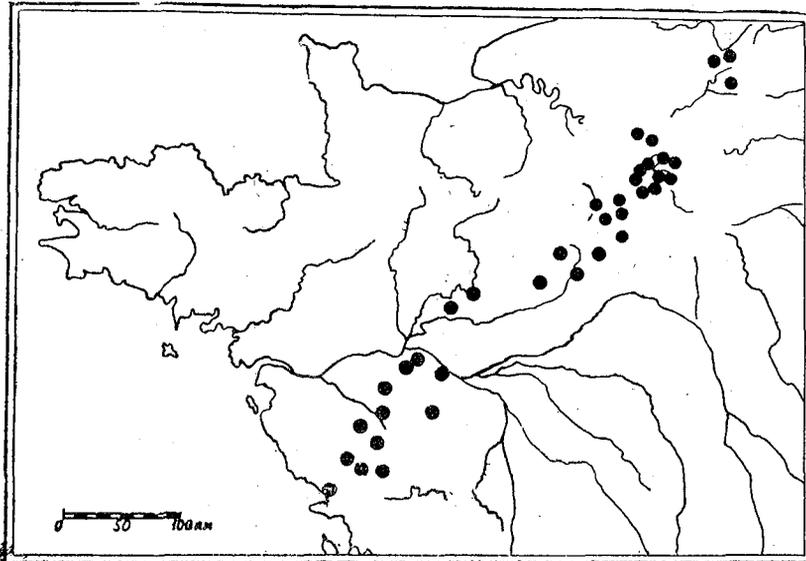


Рис. 35. Зона выпадения града на территории Франции; 30 августа 1951 г.

## Продолжительность, повторяемость градобитий и районы их распространения

Продолжительность выпадения града колеблется в широких пределах — от нескольких минут до получаса и более. В США (штат Канзас) отмечен случай выпадения града (3 июня 1959 г.) в продолжении 1 ч. 25 мин. Слой града, покрывающий поверхность земли, имеет различную высоту — от отдельных градин до нескольких десятков сантиметров. Например, в США (штат Канзас) в июне 1959 г. толщина слоя града составляла 45 см, в районе Кисловодска в августе 1965 г. — 75 см.

В большинстве случаев град в течение года наблюдается не часто, всего лишь несколько дней. Максимальное число дней с градом наблюдается в горных районах, например на северных склонах Кавказского хребта, в Закавказье, на юго-востоке Казахстана, в Крыму, где в течение года град выпадает 8—10 раз.

Распределение числа дней с градом по земному шару неравномерно. Град не бывает в полярных областях, где конвективные облака встречаются крайне редко, в пустынных районах тропической зоны, где отсутствуют условия, необходимые для образования мощных конвективных облаков. По данным Г. К. Сулаквелидзе, градобития на земном шаре наблюдаются на широтах от экватора до 60—65 параллели, причем в континентальных районах умеренной зоны — в теплый период года, а в океанических областях — зимой. В континентальных районах около 60% случаев выпадения града отмечено днем в период от 13 до 19 часов. В приморских районах, для которых типичны ночные грозы, град чаще наблюдается в темную часть суток.

### Меры борьбы с градобитиями

Борьба с градобитиями сводится к воздействию на градовые процессы. С помощью радиолокатора в облаке обнаруживается очаг зарождения града, в который с помощью безосколочных снарядов «Эльбрус-2» или ракет «Облако» и «ПГИ» вносят кристаллизующий реагент (йодистое серебро, сухая углекислота и др.). Известно, что один грамм йодистого серебра при возгонке в переслажденной части облака создает  $10^{12}$  ледяных кристаллов, на которых начинается образование мелких капель. Рост крупных градин прекращается. Обычно при воздействии используется 50—100 г реагента на облако.

Работы по воздействию на градовые процессы проводятся во Франции, в Швейцарии, Канаде, Аргентине, Болгарии, Венгрии и других странах. В СССР ведутся систематические работы по предотвращению градобитий на территории Северного Кавказа, Молдавии, Закавказья, в горных районах республик Средней Азии. Организация противорадовой защиты довольно сложна. Поскольку радиус действий локатора ограничивается 40 км, то

при защите от града больших территорий организуются экспедиции, состоящие из трех-четырех противоградовых отрядов, снабженных радиолокационными установками и орудиями. В настоящее время в Советском Союзе от градобития охраняется около 2,5 млн. га земли. В районах действия противоградовой защиты ущерб, приносимый градом посевам, в среднем сокращен на 70—80%, а в отдельные годы в некоторых сельскохозяйственных районах удается ликвидировать градобития полностью.

#### § 4. ЗАМОРОЗКИ

##### Влияние заморозков на растения

Под заморозком понимают кратковременное понижение температуры до  $0^{\circ}\text{C}$  и ниже на поверхности почвы или в травостое на фоне положительных среднесуточных температур воздуха. При этом в воздухе (в метеорологической будке) температура может быть как ниже, так и выше  $0^{\circ}\text{C}$ . Заморозок считается особенно опасным, если он наблюдается на  $1/3$  и более посевной площади зерновых, технических, овощных, плодовых и других культур области (края, республики и т. д.).

Влияние заморозка на растение изучено недостаточно полно. Существует несколько гипотез, позволяющих объяснить причины повреждения растений заморозком. Упрощенно этот процесс можно представить так. При понижении температуры до отрицательных значений вода, содержащаяся в межклеточниках, замерзает, образуются мельчайшие кристаллики льда. Эти кристаллики растут за счет диффузии водяного пара из клеток, давят на них и наносят им механические повреждения. Одновременно клетки обезвоживаются, так как при низких температурах замедляется подток воды от корневой системы. Обезвоживание тем больше, чем длиннее период с отрицательной температурой.

Повреждение растений заморозком в большой мере зависит от погодных условий следующего дня. Если утром наблюдается значительная облачность, радиационный нагрев растений мал, кристаллики тают медленно и клетки, постепенно усваивая влагу, восстанавливают свою жизнеспособность. При сильном утреннем нагревании влага из межклеточников быстро испаряется, поврежденные клетки не успевают восстановить дефицит влаги и высыхают, что может привести к гибели отдельных частей растения.

В настоящее время обнаружены и другие причины повреждения растений заморозками: так, гибель теплолюбивых культур от длительного воздействия отрицательных температур, мало отличающихся от нуля, связывают с нарушением обмена веществ. Известно, например, что наблюдается тесная связь между обменом веществ и структурой протоплазмы. Во время заморозков у более холодостойких растений вязкость протоплазмы клеток меньше, а у теплолюбивых — больше. Поэтому у теплолюбивых растений

Температура воздуха (°С), при которой наблюдается повреждение растений разных групп устойчивости к заморозкам (по В. Н. Степанову)

Культура	Всходы	Цветение	Молочная спелость
1. Наиболее устойчивые			
Пшеница яровая	— (9÷10)	— (1÷2)	— (2÷4)
Овёс	— (8÷9)	— (1÷2)	— (2÷4)
Ячмень	— (7÷8)	— (1÷2)	— (2÷4)
Горох	— (7÷8)	— (2÷3)	— (3÷4)
2. Устойчивые			
Подсолнечник	— (5÷6)	— (2÷3)	— (2÷3)
Лен	— (5÷7)	— (2÷3)	— (2÷4)
Конопля	— (5÷7)	— (2÷3)	— (2÷4)
Свекла сахарная	— (6÷7)	— (2÷3)	—
3. Среднеустойчивые			
Люпин желтый	— (4÷5)	— (2÷3)	—
Соя	— (3÷4)	— 2	— (2÷3)
Редис	— (4÷5)	—	—
4. Малоустойчивые			
Кукуруза	— (2÷3)	— (1÷2)	— (2÷3)
Просо	— (2÷3)	— (1÷2)	— (2÷3)
Картофель	— (2÷3)	— (1÷2)	— (1÷2)
Сорго	— (2÷3)	— (1÷2)	— (2÷3)
5. Неустойчивые			
Гречиха	— (1÷2)	— 1	— (1,5÷2)
Хлопчатник	— (0,5÷1)	— (0,5÷1)	— 1
Рис	— (0,5÷1)	— 0,5	—
Огурцы, томаты	— (0÷1)	— (0÷1)	— (0÷1)

даже при слабом заморозке вязкость протоплазмы возрастает до критического значения, при котором нарушается обмен веществ. При этом меняется скорость химических реакций и нарушается жизнедеятельность растений, что иногда приводит к гибели отдельных клеток и органов.

Различные растения неодинаково реагируют на заморозок. У каждого вида растений есть «критическая» температура, при которой оно повреждается или гибнет. В. Н. Степанов классифицировал сельскохозяйственные растения по степени устойчивости к заморозкам, разделив их на пять групп. В табл. 20 приведены названия некоторых культур, относящихся к различным группам. Следует иметь в виду, что температура здесь показана по данным метеорологической будки и что на уровне растений она может быть несколько ниже. Как видно из этой таблицы, устойчивость растений к заморозкам меняется в течение вегетационного периода. Наиболее устойчивы к ним растения в начале периода вегетации. Установлено, что наибольший ущерб посевам наносят заморозки, возникающие в период активной вегетации, т. е. когда средняя суточная температура воздуха становится выше  $10^{\circ}\text{C}$ . Ранневесенние и поздневесенние заморозки большого вреда посевам не причиняют.

Степень повреждения определенной культуры заморозком помимо ее физиологических особенностей зависит от многих внешних причин и в первую очередь от интенсивности и продолжительности заморозка, степени закалки растений, содержания влаги в их тканях. Чем интенсивнее заморозок, тем больше площадь поврежденных посевов. Однако заморозок сильный, но кратковременный, обычно наносит меньший ущерб, чем слабый, но длительный. Большую роль в устойчивости растений к заморозкам играет содержание в клетках сахара, который, связывая воду, способствует меньшему их обезвоживанию в период с отрицательными температурами.

### **Причины возникновения заморозков.**

#### **Типы заморозков**

В зависимости от метеорологических процессов, приводящих к возникновению заморозков, их разделяют на три типа.

1. Радиационные заморозки. Они возникают в результате интенсивного ночного выхолаживания деятельного слоя почвы и прилегающих слоев воздуха, которое наблюдается в тихие безоблачные ночи. При этом в приземном слое наблюдается инверсия температуры. Радиационные заморозки обычно отличаются небольшой интенсивностью, температура воздуха в метеорологической будке может быть положительной, а на поверхности почвы и растений она понижается от 0 до  $-2^{\circ}\text{C}$ . Радиационный заморозок в основном повреждает растения, относящиеся, по классификации В. Н. Степанова, к пятой группе и частично к четвертой. Такие заморозки наблюдаются только ночью, непродолжительны, но мо-

гут повторяться несколько ночей подряд. Наиболее часто они наблюдаются в пониженных местах рельефа.

2. Адвективные заморозки. Причиной возникновения этих заморозков является проникновение на территорию холодных воздушных масс воздуха арктического происхождения преимущественно в тылу циклона, за холодным фронтом. Адвективные заморозки могут наблюдаться в любое время суток, охватывая большие территории. При этом отрицательные температуры наблюдаются не только на почве, но и в воздухе. На поверхности почвы и растений минимальная температура часто понижается до  $-(3 \div 4)^\circ\text{C}$ , вследствие чего могут повреждаться растения пятой, четвертой и третьей групп (по классификации В. Н. Степанова). Однако адвективные заморозки чаще всего наблюдаются ранней весной или поздней осенью при общем низком уровне температуры. В период вегетации многих культур заморозки такого типа отмечаются редко и в большинстве случаев не являются опасными. Если же они совпадают с периодом активной вегетации, то наносят большой ущерб посевам и плодовым деревьям. Адвективные заморозки обычно повторяются в течение нескольких суток, причем отмечается сильный ветер, вызывающий интенсивное перемешивание воздуха в приземном слое, поэтому микроклиматические особенности территории здесь проявляются слабо.

3. Адвективно-радиационные заморозки — это такой их тип, при котором холодные арктические вторжения сопровождаются интенсивным радиационным выхолаживанием деятельного слоя почвы и прилегающих слоев воздуха. Минимальная температура на уровне растений и на почве может понижаться до  $-(5 \div 6)^\circ\text{C}$ . Однако адвективно-радиационные заморозки чаще всего возникают на фоне сравнительно высоких среднесуточных температур, т. е. поздней весной или ранней осенью, когда минимальные температуры ночью значительно выше нуля. Поэтому при вторжении холодного воздуха и его радиационном выхолаживании, хотя температура деятельного слоя значительно понижается, минимальная температура на почве мало отличается от  $0^\circ\text{C}$ , а в метеорологической будке — положительна. В районах с резко континентальным климатом такие заморозки могут наблюдаться при среднесуточной температуре воздуха выше  $15^\circ\text{C}$ . В это время растения потеряли свою морозоустойчивость, и даже незначительный заморозок может нанести существенный ущерб посевам.

Адвективно-радиационные заморозки, как и адвективные, отмечаются на большой территории и воздействие их продолжается в течение нескольких суток подряд. Наибольшей интенсивности они достигают ночью, перед восходом солнца, а днем ослабевают.

### Распространение заморозков на территории СССР

Изучение географического распределения заморозков осложнено тем, что на их возникновение в значительной степени влия-

ют местные условия: усиливают или ослабляют интенсивность заморозка, определяют его повторяемость и т. д. Поэтому обычно рассматривают распространение по территории заморозков, которые наблюдаются в метеорологической будке на станциях, расположенных на ровном открытом месте на равнине или на пологом склоне в горных районах.

Детальная агроклиматическая характеристика заморозков разработана И. А. Гольцберг. Ею получены карты средних дат окончания заморозков весной и наступления осенью. По этим датам можно вычислить продолжительность периода без заморозков, т. е. интервала времени с минимальной температурой воздуха выше  $0^{\circ}\text{C}$ . Карта распределения заморозков на территории Советского Союза показана на рис. 36. Продолжительность периода без заморозков в СССР меняется по территории существенно — от 45 до 270 дней, что влияет на распределение сельскохозяйственных культур. Этот период очень сильно варьирует в зависимости от местных условий.

Значительное влияние на возникновение заморозка оказывает рельеф. При радиационных и адвективно-радиационных заморозках минимальная температура наблюдается в пониженных частях рельефа, где застаивается холодный воздух, стекающий с более высоких мест. Вершины и верхние части склонов при этом оказываются менее морозоопасными, так как холодный воздух оттекает вниз, а на его месте поступают порции более теплого. И. А. Гольцберг выявила закономерность изменения продолжительности периода без заморозков под влиянием различных форм рельефа (табл. 21). Знаком плюс здесь отмечено увеличение продолжительности безморозного периода, знаком минус — уменьшение его по сравнению с ровным открытым местом на равнине или на пологом открытом склоне в горах. Помимо рельефа на продолжительность периода без заморозков влияет близость водоемов, способствующих увеличению эффективного излучения, что, в свою очередь, уменьшает интенсивность радиационного заморозка. На интенсивность заморозков существенно влияет экспозиция склонов. Так, на восточных и южных склонах после восхода солнца растения облучаются солнечной радиацией значительно, чем на других, что приводит к быстрому испарению льда из межклеточных пространств и большому повреждению растительных организмов. На этих склонах растения сильнее подвержены действию заморозков, чем на северных и западных.

Важную роль в возникновении заморозков играет лес. В зависимости от взаимного расположения леса и поля интенсивность и повторяемость заморозков бывают различными. Если лес расположен на склоне, то он препятствует стоку холодного воздуха вниз, поэтому участки, расположенные выше леса, чаще подвергаются действию заморозков, а на полях, расположенных ниже леса, их повторяемость уменьшается. Если лес расположен на ровном месте, то при адвективном заморозке он задерживает хо-

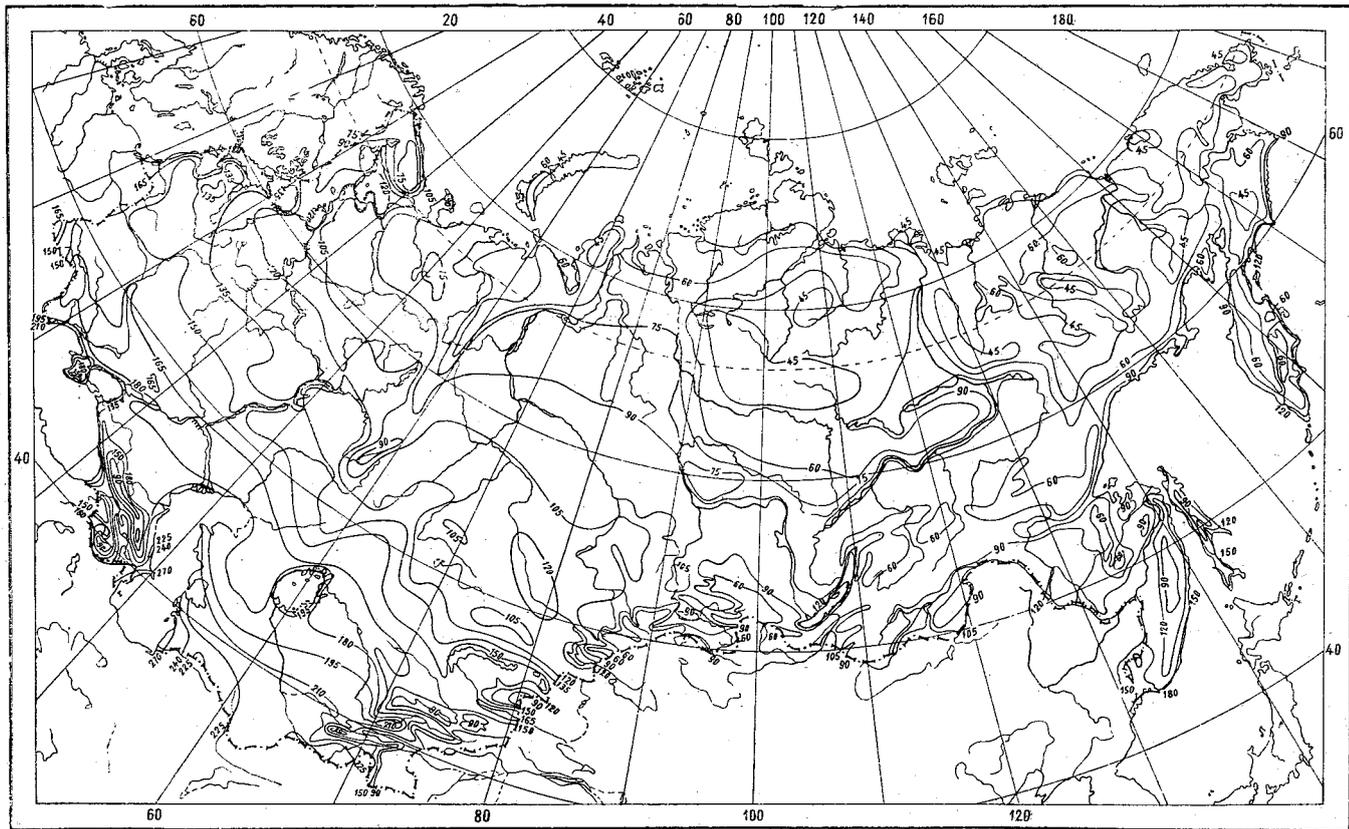


Рис. 36. Средняя продолжительность периода без заморозков (в днях) на ровном открытом месте.

лодный воздух и ослабляет заморозок на полях за лесом. Одновременно лес увеличивает вероятность радиационных заморозков на поляне. Вследствие ослабления ветра и понижения интенсивности турбулентного обмена здесь ночью создаются глубокие инверсии, в результате чего продолжительность периода без заморозка уменьшается на 20—25 дней.

Таблица 21

**Изменение продолжительности периода без заморозков  
в зависимости от местоположения станции, дни**

Местоположение станции	Изменение средних дат заморозков		Изменение продол- жительности периода без заморозков
	Весна	Осень	
Вершины и верхние части склонов	+10	+10	+20
Долнины в холмистой местности с относительной разностью вы- сот бровка — дно 50—100 м	—5	—10	—15
Долнины в горах с относитель- ной разностью высот бровка — дно выше 100 м	—12	—13	—25
Котловины и замкнутые доли- ны в горах	—18	—22	—40
Горные плато	—5	—10	—15
Плоские котловины в конти- нентальном климате	—11	—14	—25
Сырые низины	—11	—14	—25
Поляны	—11	—14	—25
Острова среди моря	+10	+25	+35
Косы на взморье	+10	+15	+25
Побережье моря	+8	+12	+20
Долнины больших рек	+5	+10	+15
Города	+5	+10	+15

На степень повреждения растений заморозками влияет также густота травостоя. Чем реже травостой, тем сильнее нагревается почва под растениями днем и охлаждается ночью, т. е. наиболее интенсивный заморозок наблюдается на почве. При густом травостое самые низкие температуры ночью наблюдаются на высоте более густой его части ( $2/3$ — $3/4$  от высоты растений). Следовательно, самому сильному заморозку подвергаются цветы, колосья, плоды, в то время как в метеорологической будке и на почве температуры могут быть положительными.

Применяемые в практике сельского хозяйства методы борьбы с заморозками можно разделить на две группы:

### 1. Биологические методы.

Большую роль в борьбе с заморозками играет выведение морозоустойчивых сортов сельскохозяйственных культур, внедрение скороспелых сортов и т. д. Повышение морозоустойчивости культуры дает существенные результаты. Однако метод отличается сложностью и трудоемкостью. Поэтому для предохранения растений от заморозков чаще используются различные агротехнические приемы.

### 2. Агротехнические приемы.

Установлено, что для предохранения растений от заморозков часто бывает достаточно повысить их температуру на 1—2°, а повышение ее на 3—4° почти полностью обеспечивает сохранность урожая. Поэтому агротехнические приемы направлены на уменьшение охлаждения растений в ночные часы и нагревания прямыми солнечными лучами в утренние. При выборе метода борьбы с заморозками необходимо иметь представление о его метеорологической эффективности. Наиболее широкое распространение получили следующие методы:

**Укрытие растений.** Целью укрытия является уменьшение эффективного излучения деятельного слоя и повышение минимума температуры воздуха вблизи растений. Почва и растения прикрываются стеклом, пленкой, ветками хвойных деревьев, соломенными покрытиями. В субтропиках на плантациях цитрусовых культур применяются чехлы из трехслойной марли, способствующие повышению температуры растений на 1—2°. Иногда для этой цели используются специальные непромокаемые бумажные мешки, благодаря чему температура повышается более чем на 1°.

**Дымление.** Дымовую завесу можно создать путем сжигания дымовых куч или специальных дымовых шашек. Влияние дымовой завесы на температуру приземного слоя воздуха заключается в следующем. При сгорании дымовой смеси выделяется тепло, повышающее температуру воздуха на  $\Delta T_{\text{тепл}}$ . Образовавшийся дым ослабляет тепловое излучение земли, увеличивает противозлучение атмосферы, поэтому эффективное излучение на задымленном участке несколько уменьшается. В результате повышается температура воздуха на  $\Delta T_{\text{изд}}$  по сравнению с незадымленным участком. В дымовой завесе обычно содержатся гигроскопические вещества, являющиеся ядрами конденсации. При конденсации водяного пара выделяется тепло, повышающее температуру на  $\Delta T_{\text{конд}}$ . Суммарный температурный эффект дымовой завесы можно представить следующим образом:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{тепл}} + \Delta T_{\text{изд}} + \Delta T_{\text{конд}} \quad (72)$$

Эксперименты показали, что основную роль в повышении температуры воздуха при дымлении играет выделение тепла при сгорании дымовой смеси. Температурный эффект от уменьшения эффективного излучения зависит от концентрации дыма, толщины слоя, состава дымовых частиц и т. д. Величина  $\Delta T_{\text{изл}}$  существенно увеличивается, если в дымовой смеси содержатся вещества с большой поглощательной способностью в диапазоне волн 8—12 мкм, для которых атмосфера прозрачна. Третье слагаемое в формуле (72) сравнительно велико в том случае, когда сравнительно велика относительная влажность воздуха. По данным М. Е. Берлянда и П. Н. Красикова, суммарный температурный эффект при дымлении не превышает 2°. Однако фактически воздействие дымовой завесы больше, поскольку продолжается и после восхода солнца, когда дым снижает утреннее нагревание растений. Особенно это важно при высотах солнца 5—25°, так как лучи проходят в дымовой завесе длинный путь и могут ослабляться на 50—60%. Очень часто эффективность утреннего воздействия дымовой завесы больше, чем ночного.

Открытый обогрев. Этот метод применяется для спасения от заморозка главным образом субтропических культур. На плантациях по определенной схеме размещаются грелки, в которых сжигается топливо. Изменение температуры воздуха при использовании грелок происходит за счет конвективного теплообмена нагретых стенок с воздухом ( $\Delta T_{\text{конв}}$ ), а также в результате лучистого теплообмена между поверхностью грелки и воздухом ( $\Delta T_{\text{изл}}$ ) и за счет тепла, выносимого из трубы нагретыми газами ( $\Delta T_{\text{г}}$ ). Суммарный температурный эффект определяется следующим уравнением:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{конв}} + \Delta T_{\text{изл}} + \Delta T_{\text{г}}. \quad (73)$$

Грелки, применяемые в СССР, способствуют максимальному повышению температуры воздуха на 3—4°. Температурный эффект уменьшается с удалением от грелки и при сильном ветре. Опыты показали, что грелки целесообразно применять при скоростях ветра не более 5—6 м/с на высоте 2 м. Наибольший температурный эффект отмечен при скорости ветра 0,5—1 м/с.

Противозаморозковое дождевание. За несколько часов до заморозка производится полив сельскохозяйственных культур путем дождевания. При дождевании увеличивается влажность воздуха и при последующем понижении температуры может начаться конденсация водяного пара. При этом возрастает противозлучение атмосферы. Испарение влаги с поверхности растений вызывает понижение их температуры и, соответственно, уменьшение излучательной способности. Следовательно, эффективное излучение становится меньше. Увлажнение почвы способствует росту теплопроводности, что в свою очередь увеличивает приток тепла из более глубоких слоев. Все это приводит к некоторому повышению температуры воздуха вблизи растений. Если все же она ста-

новится отрицательной, то на поверхности растений появляется лед, при образовании которого выделяется тепло. Если дождевание продолжается в течение всего заморозка, то температура растений не может опуститься ниже  $0^{\circ}\text{C}$  (температуры образования льда). Особенно экономически эффективен этот метод при сильных заморозках.

Помимо изложенных существуют и другие способы защиты от заморозков. Наибольший эффект в борьбе с ними получается при использовании комплекса мероприятий, с учетом микроклиматических особенностей полей и физиологии растений.

## § 5. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПЕРЕЗИМОВКУ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР

Озимые культуры широко распространены на земном шаре, а в СССР на их долю приходится более  $1/3$  валового сбора зерна. Урожай озимых часто снижается из-за неблагоприятных условий перезимовки, которая зависит от комплекса агрометеорологических условий, биологических особенностей сорта растений, состояния их в момент прекращения осенней вегетации и т. д. Озимые культуры в течение зимнего периода находятся в состоянии покоя, в них протекают только те процессы, которые необходимы для поддержания жизни и возобновления вегетации весной. Различные сельскохозяйственные культуры в этот период неодинаково относятся к агрометеорологическим условиям, что определяется климатом родины культуры, под влиянием которого сформировались ее биологические особенности. В связи с этим озимые имеют разную морозоустойчивость, т. е. способность переносить низкие температуры.

Исследования Н. А. Максимова показали, что при длительном воздействии на растения низких температур происходит обезвоживание протоплазмы клеток, которое является результатом перегонки влаги из клеток на кристаллики, образовавшиеся в межклеточных пространствах. Кроме того, растущие ледяные частицы наносят механические повреждения растительным тканям. Каждому виду растений свойственна определенная критическая температура, при которой начинаются повреждения. Наиболее устойчивой культурой, возделываемой в СССР, является озимая рожь. Температура, при которой начинается ее вымерзание, у разных сортов составляет  $-(18 \div 24)^{\circ}\text{C}$ , а у особенно морозоустойчивых до  $-(25 \div 28)^{\circ}\text{C}$ . Менее морозоустойчивы озимая пшеница (критическая температура вымерзания  $-(17 \div 19)^{\circ}\text{C}$ ) и озимый ячмень ( $-(13 \div 15)^{\circ}\text{C}$ ). Критическая температура в течение зимы не остается постоянной. Она понижается от осени к зиме, а к весне несколько повышается. Кроме того, она заметно меняется по территории, понижаясь с ростом континентальности климата (табл. 22).

Таблица 22

## Температура повреждения озимой пшеницы (°С) при различных условиях закали

Район	Условия закали		
	хорошие	средние	плохие
Украина, Северный Кавказ, Белоруссия, северо-запад ЕТС	—(18—20)	—(16—18)	—(14—16)
Центральночерноземная область, центральные и северные области Нечерноземной зоны:	—(20—22)	—(18—20)	—(16—18)
Поволжье, юг Урала, Западная Сибирь, Северный Казахстан	—(22—25)	—(20—23)	—(18—21)

Степень сопротивления растений неблагоприятным условиям зимы в большой мере зависит от метеорологических условий осени. При определенных погодных условиях осенью происходит закалка растений, в результате чего, повышается их сопротивляемость низким температурам и другим неблагоприятным условиям, т. е. зимостойкость.

Зимостойкость — способность растений переносить неблагоприятные условия зимнего периода, т. е. противостоять вымерзанию, выпрежанию, вымоканию и т. д. И. И. Туманов выделил две фазы закали растений.

Первая фаза протекает при безоблачной или малооблачной погоде, среднесуточной температуре воздуха  $6-0^{\circ}\text{C}$  и большой амплитуде суточного ее хода, когда днем  $5-10^{\circ}\text{C}$ , а ночью  $-(1\div 2)^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность первой фазы закали 12—14 дней. При этих условиях процесс роста из-за недостатка тепла протекает медленно, а фотосинтез довольно интенсивно, в результате в тканях растений накапливаются сахара. Хорошо развитые растения содержат сахаров иногда до 20—30% от веса сухой массы. В дальнейшем сахар играет защитную роль в жизни растений, связывая воду, содержащуюся в тканях. Уже после первой фазы закали растения способны переносить температуру  $o-(10\div 12)^{\circ}\text{C}$ .

Вторая фаза закали протекает после первой при средней суточной температуре воздуха  $-(2\div 5)^{\circ}\text{C}$  в течение 3—5 дней. При такой температуре крахмал переходит в сахар, содержание которого быстро увеличивается. Одновременно происходит обезоживание клеток за счет перехода части воды в лед. Сахар, растворяясь в воде, связывает ее. Повышается концентрация клеточ-

ного сока, вследствие чего уменьшается интенсивность диффузии водяного пара в межклеточки, замедляется рост кристаллов.

Результатом хорошей закалки является рост зимостойкости культуры. Если же после успешной закалки наступает теплая влажная погода с обильными осадками, то растения теряют приобретенные качества, зимостойкость их понижается. Следовательно, зимовка озимых культур в большой мере зависит от погодных условий осени. Закаливание свойственно не только озимым злакам, но и древесной растительности, в том числе и плодовым деревьям.

## § 6. ВЫМЕРЗАНИЕ ПОСЕВОВ

По данным В. А. Моисейчик, детально изучившей условия перезимовки растений, на территории СССР вымерзание — главная причина гибели озимых культур на больших площадях. Вымерзание наблюдается в тех случаях, когда температура почвы на глубине узла кущения (примерно 3 см) становится ниже критического значения. Это происходит при отсутствии снежного покрова или при небольшой его высоте. В § 5 отмечалось, что гибель от низких температур наступает в результате обезвоживания протоплазмы и повреждения клеток кристаллами льда. Чтобы произошло

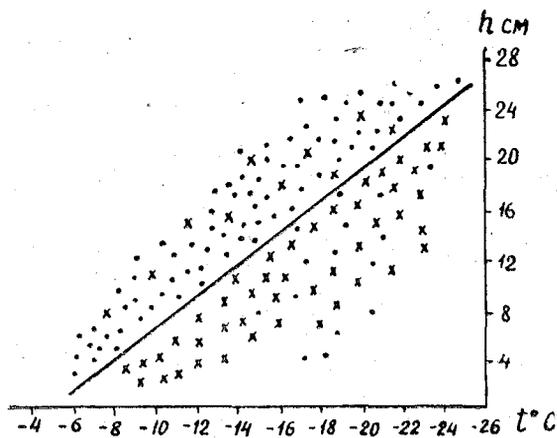


Рис. 37. Критическое соотношение температуры воздуха ( $t^{\circ}\text{C}$ ) и высоты снежного покрова ( $h$ ) для озимой пшеницы:

● — посевы сохранились; × — посевы погибли

обезвоживание, температура растений должна длительное время удерживаться ниже критического значения. А. М. Шульгин показал, что озимая пшеница, находящаяся при температуре почвы на глубине узла кущения, равной  $-20^{\circ}\text{C}$ , в течение 26 ч вымерзает на 43%, 36 ч — на 65% и 46 ч — на 96% площади. В связи с эти

Н. Н. Яковлев рекомендовал для характеристик состояния растений рассматривать не минимальную температуру на глубине узла кущения, которая может удерживаться очень непродолжительный период времени, а среднесуточную, отражающую режим всех суток.

Немаловажную роль в вымерзании посевов играет скорость понижения температуры, с увеличением которой погибает большое количество растений, так как вода не успевает перейти в межклеточные пространства, кристаллизуется в клетках, что приводит к их повреждению и нарушению жизнедеятельности.

Температура почвы на глубине узла кущения зависит от высоты снежного покрова. На рис. 37 приведены высоты снежного покрова, при которых в зависимости от температуры посевы сохраняются или гибнут. Можно заключить, что даже при очень низкой температуре воздуха снежный покров высотой более 20—25 см гарантирует сохранение посевов от вымерзания. Следовательно, вымерзание чаще наблюдается в районах с суровыми малоснежными зимами (рис. 38), а именно — в Нижнем Поволжье, Северном Казахстане, на юге Западной Сибири. В районах с высоким снежным покровом (север и северо-запад ЕТС), а также на юго-западе ЕТС и в Закавказье, где зимой температура почвы не понижается до критических значений, оно не наблюдается.

### Методы борьбы с вымерзанием посевов

Методы борьбы с вымерзанием посевов можно разделить на биологические и агротехнические.

Биологические методы состоят в выведении морозоустойчивых сортов. В последние годы в СССР широкое распространение получили морозоустойчивые сорта озимой пшеницы Лютеценс-329, Одесские-16, 25, 51. Мироновская-808 и другие, критическая температура вымерзания которых составляет — (17 ÷ ÷ 19)° С. На морозоустойчивость растений большое влияние оказывает минеральная подкормка, особенно фосфорно-калийная. Она способствует более мощному развитию корневой системы и накоплению в растениях сахаров.

Агротехнические приемы борьбы с вымерзанием состоят в основном в проведении снежных мелиораций. С их помощью увеличивается высота снежного покрова, достигается более равномерное распределение его по площади, создаются такие условия, при которых на глубине узла кущения температура становится выше критического значения. Снежные мелиорации осуществляются путем снегозадержания и снегонакопления. Снегозадержание направлено на удержание и сохранение выпавшего снега от сдувания сильными ветрами. Снегонакопление — удержание снега, принесенного ветром с окружающих площадей. Оба приема способствуют повышению температуры почвы, а также увеличению влагозапасов.

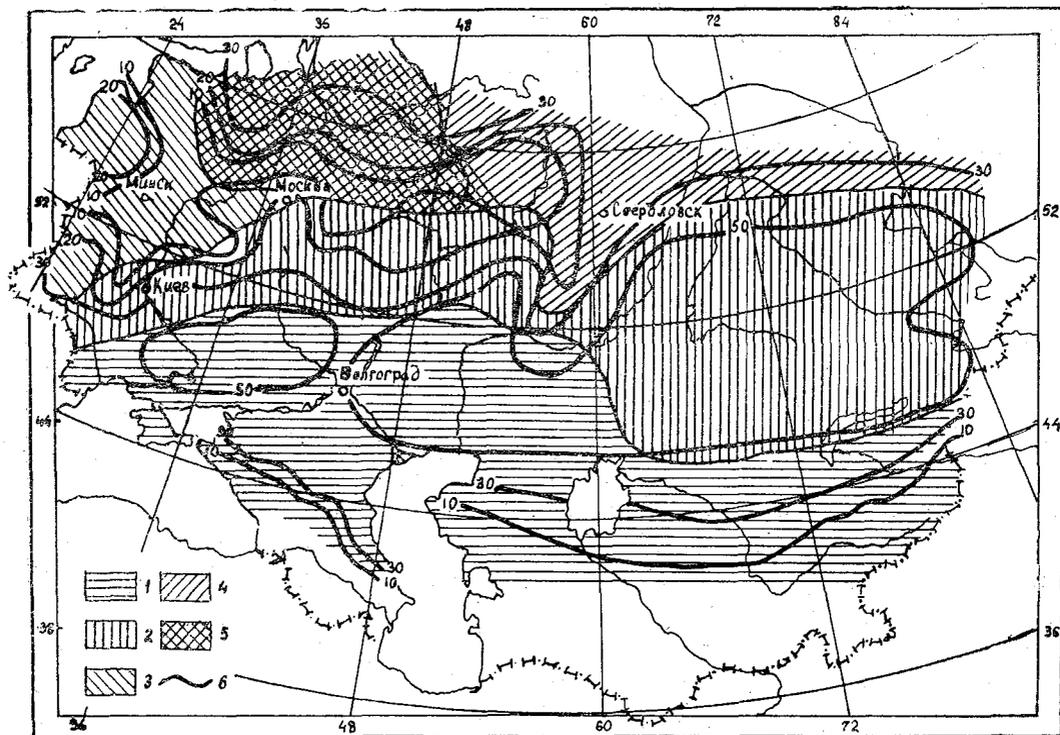


Рис. 38. Преобладающие причины гибели озимых культур районированных сортов при перезимовке на площади более 10% их посевов:

1—вымерзание и слабое развитие посевов из-за осенней засухи, 2—вымерзание; 3—вымокание; 4—выпревание; 5—вымокание и выпревание; 6—вероятность (% лет) гибели посевов с морозостойкостью на юге—16°C, в остальных районах—18°C

Снегозадержание и снегонакопление ведутся в районах, где высота снежного покрова не превышает 30 см. При большей высоте снежные мелиорации с уменьшением вымерзания могут привести к созданию других неблагоприятных условий. Снегозадержание и снегонакопление осуществляется с помощью кулисных посевов, расстановки щитов, полезащитных лесных полос, кустарниковых защит, оставления на зиму полос стерни и др. При организации снежных мелиораций большое значение имеет правильный долгосрочный прогноз температуры и осадков зимой. В случаях, когда ожидаются сильные морозы и невысокий снежный покров, увеличиваются площади, на которых проводятся снежные мелиорации и накапливается больше снега.

### § 7. ВЫПРЕВАНИЕ ПОСЕВОВ

Выпревание — сложный процесс. В общих чертах его можно представить так. Если высокий снежный покров ложится на непромерзшую почву и удерживается в течение нескольких месяцев, то растения, находящиеся при температуре около 0° С, из-за отсутствия света не могут ассимилировать, но интенсивно дышат, расходуя на это большое количество питательных веществ. В результате в конце зимы оказываются очень ослабленными и подвергаются грибковым заболеваниям.

И. И. Туманов выделил три фазы выпревания: углеводное истощение, голодание, гибель от грибковых заболеваний. В течение первой фазы наблюдается расход питательных веществ на дыхание, интенсивность которого зависит от температуры растений и состояния их перед уходом под снег. При хорошей осенней закалке запасы сахаров в разных частях растения составляют 17—25% сухой массы, т. е. около 250 мг на грамм сухого вещества. При плохой закалке содержание сахаров намного меньше. В течение первой фазы запас сахара начинает истощаться тем быстрее, чем выше среднесуточная температура под снегом (табл. 23).

Таблица 23

Расход сахаров на дыхание хорошо закаленными озимыми культурами за сутки в зависимости от среднесуточной температуры

Температура, °С	7	6	5	4	3	2	1	0	—1
Расход сахаров, мг	9,86	9,07	8,30	7,56	6,91	6,31	5,74	5,23	4,73
Температура, °С	—2	—3	—4	—5	—6	—7	—8	—9	—10
Расход сахаров, мг	4,27	3,84	3,43	3,05	2,66	2,30	1,97	1,66	1,37

Процесс истощения длится 2—3 мес., после чего наступает фаза голодания, в течение которой растения пополняют запасы сахаров за счет перехода в них крахмала. При этом происходит расход белков и распад тканей клеток. Фаза голодания начинается, когда запас сахара в тканях падает до 2—4% сухой массы. Большая часть растений погибает при длительности голодания 30—40 дней. Если в период фазы голодания снежный покров не сошел, то на растениях развивается снежная плесень и через несколько дней они погибают. Наиболее благоприятные для развития грибковых заболеваний условия наблюдаются при температуре под снегом выше 0°С и относительной влажности воздуха около 90%. Если после фазы голодания снежный покров быстро сходит, то жизнеспособность растений восстанавливается.

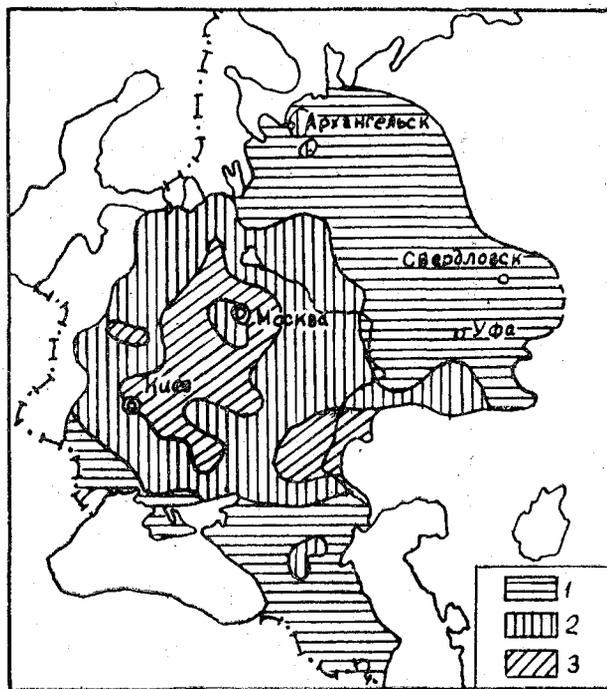


Рис. 39. Повторяемость лет с притертой ледяной коркой (%):

1 — < 50; 2 — 50—70; 3 — > 70

Выпревание довольно длительный процесс. По данным В. А. Моисейчик, оно наблюдается на больших площадях, если неблагоприятные условия сохраняются в течение 80—100 дней и более при высоте снежного покрова  $\geq 30$  см и глубине промер-

зания почвы  $\leq 50$  см. В. А. Мойсейчик получила зависимость количества сохранившихся за зиму стеблей у озимой ржи от продолжительности залегания снежного покрова высотой  $\geq 30$  см:

$$P = 123,0 - 5,4 \cdot n, \quad (74)$$

где  $P$  — отношение количества стеблей на  $1 \text{ м}^2$  при весеннем и осеннем обследованиях посевов, %;  $n$  — продолжительность залегания снежного покрова высотой  $\geq 30$  см, декады.

На рис. 38 цифрами обозначены районы с различной вероятностью выпревания озимой пшеницы. Наиболее часто этот процесс наблюдается в северных и северо-восточных районах ЕТС, севернее линии Минск—Саратов. Здесь снежный покров не сходит в течение 3—4 мес. Выпреванию обычно подвергаются посевы на меньших площадях, чем вымерзанию.

### Меры борьбы с выпреванием

В борьбе с выпреванием используются биологические методы и агротехнические приемы. Одной из наиболее эффективных мер борьбы с выпреванием является выведение устойчивых сортов. Большое значение для успешной перезимовки растений под высоким снежным покровом имеет своевременность сева озимых культур. Сроки сева не должны быть слишком ранними, чтобы растения ушли под снег непереросшими. Существенное влияние на перезимовку посевов оказывает интенсивная минеральная подкормка осенью. Однако наибольший эффект дают агротехнические приемы, способствующие понижению температуры под снегом и, следовательно, уменьшению интенсивности расходования сахаров. В тех случаях, когда выпревание посевов уже началось, целесообразно весной раньше освобождать поля от снега, что достигается путем его разбрасывания, а иногда чернения.

### § 8. ВЫМОКАНИЕ ПОСЕВОВ

Вымокание озимых культур наблюдается при длительном их затоплении. Физиологические процессы, приводящие к повреждению и гибели посевов при затоплении, изучены слабо. Одни исследователи предполагают, что основной причиной гибели растений в этих условиях является нарушение процесса дыхания из-за недостатка кислорода, другие — нарушение питания из-за недостатка углекислоты. Наиболее часто растения страдают от вымокания весной, когда они ослаблены перезимовкой, особенно на полях, где зимой наблюдалось выпревание. Затопление посевов в течение 5—10 дней осенью и зимой существенного ущерба не наносит.

Последствия весеннего вымокания посевов сказываются и в летний период, так как при длительном затоплении почвы теряет структуру, нарушается аэрация, из почвы вымываются питательные вещества, что приводит к снижению урожайности.

Изреженность посевов при вымокании зависит от многих причин, в том числе от высоты слоя воды. Если растения затоплены не полностью (верхняя их часть находится под водой), то гибель растительных организмов наблюдается значительно реже, чем при полном их затоплении.

Большую роль в вымокании играет температура воды и продолжительность периода затопления. Ф. Ш. Чечик установлена следующая зависимость изреженности посевов озимых культур в черноземной полосе ЕТС от температуры воды:

Температура воды, °С . . . . .	0	1	2	3	4
Изреженность посевов, % . . . . .	6	14	23	32	44

Изреженность посевов тем больше, чем длительнее период затопления; например, если растения полностью покрыты водой, то при продолжительности затопления менее 10 дней изреженность посевов составляет 5—25%, при 15-дневном затоплении 15—35%, а при 25—30-дневном посевы погибают полностью. В. А. Моисейчик рекомендует определять изреженность озимых культур в результате вымокания в пониженных частях рельефа весной по уравнению

$$\bar{u} = 3,50 n + 5,20 - \bar{t}_в - 22,62, \quad (75)$$

где  $\bar{u}$  — изреженность посевов, %;  $n$  — продолжительность периода затопления (в интервале 5—35 дней);  $\bar{t}_в$  — средняя за период затопления температура воды (в интервале 0—5°С).

Наиболее часто вымокание происходит в районах с неустойчивым снежным покровом, где морозная погода быстро сменяется оттепелью и в пониженных частях рельефа скапливается большое количество воды. На ЕТС такие условия чаще всего наблюдаются в западных районах (см. рис. 38).

### Меры борьбы с вымоканием посевов

Наиболее эффективным способом борьбы с вымоканием являются осушительные мелиорации, в результате которых увеличивается сток воды с затопленных полей. Особенно хорошие результаты дает закрытый дренаж. В районах с большой повторяемостью вымокания используется бороздование посевов, выращивание растений на мелких гребнях.

### § 9. ЛЕДЯНАЯ КОРКА

Ледяная корка — слой льда, располагающийся на поверхности почвы или в снежном покрове. Толщина ее меняется от 1 до 10 см, в очень редких случаях составляет 15 см. Различают два вида ледяной корки; притертую и подвешенную.

Притертая ледяная корка представляет собой слой льда, вплотную смерзшийся с почвой и растениями. Существуют различные мнения о влиянии этого вида корки на растительный организм. По мнению большинства ученых, притертая ледяная корка ухудшает условия газообмена. Эксперименты показали, что под ней содержание  $\text{CO}_2$  в тканях растений возрастает от 1 до 20%, а  $\text{O}_2$  уменьшается от 20 до 8%. Следовательно, растения страдают от избытка углекислоты и недостатка кислорода. При изменении температуры ледяная корка деформируется и наносит растениям механические повреждения. Особенно опасна ледяная корка, расположенная на глубине узла кущения. При сильных морозах она способствует вымерзанию посевов. Установлено, что чем толще притертая ледяная корка и длительнее период ее залегания, тем больше изреженность посевов. В. М. Личикаки установил следующую зависимость изреженности посевов озимой пшеницы ( $\bar{U}\%$ ) от средней толщины ледяной корки ( $l$  см) при залегании ее более месяца:

$$\bar{U} = 5,4 + 2,8l + 1,8l^2. \quad (76)$$

При небольшой высоте притертой корки, когда верхняя часть листьев остается над ее поверхностью, изреженность посевов бывает незначительной. В низинах, где под коркой часто скапливается талая вода, повреждение растений наблюдается довольно часто.

Подвешенная корка представляет собой прослойку в снежном покрове. Этот вид корки обычно не причиняет существенного ущерба посевам. Некоторые ученые считают, что она создает парниковый эффект и тем самым улучшает условия пребывания растений под снегом. Встречается реже, чем притертая.

Ледяная корка образуется при оттепелях и последующем замерзании воды, особенно в низинах. По данным А. А. Окушко, образование ее в результате оттепелей происходит при суммах положительных температур за период оттепели 3—6°С. Ледяная корка, образовавшаяся при снеготаянии, обычно мутная, так как содержит пузырьки воздуха и нерастаявшие кристаллики льда, и растет сверху вниз. Она может возникать также при синоптических условиях, определяющих образование гололеда, т. е. при выпадении переохлажденных осадков и последующем их замерзании. Температура воздуха в будке обычно равна —3—0°С. В этом случае слой льда растет снизу вверх, он прозрачен, мало подвергается деформации. В 90% случаев ледяная корка образуется в результате снеготаяния.

По характеру распространения различают сплошную ледяную корку, залегающую сплошным слоем на всем поле, и корку, залегающую местами. Сплошная корка на территории Советского Союза наблюдается сравнительно редко (14% случаев); корка, залегающая местами, встречается чаще (86% случаев). Притертая ледяная корка наиболее часто наблюдается в центральных и юго-

западных районах ЕТС, на Украине (рис. 39). По данным А. А. Окушко, подвешенная корка чаще всего отмечается в Кировской, Пермской, Горьковской областях, Башкирской АССР. Продолжительность залегания ледяных корок на полях колеблется от одной декады до пяти-шести месяцев. Максимальная продолжительность (13—18 декад) наблюдается в северо-восточных районах ЕТС.

### Меры борьбы с ледяной коркой

Повреждение растений ледяной коркой часто является следствием не прямого ее воздействия, а влияния сопровождающих корку вымерзания, вымокания, выпревания посевов. Поэтому меры борьбы с ней включают и борьбу с этими явлениями. Основным мероприятием является снегозадержание, часто применяется отвод воды с полей, в некоторых случаях — уплотнение снега под коркой, иногда прибегают к дроблению льда, хотя этот метод малоэффективен. В некоторых случаях с ледяной коркой можно бороться с помощью покрытия ее угольной пылью, торфом, золой, уменьшающими альбедо льда. Однако в результате интенсивного таяния льда на его поверхности образуется слой воды и в дальнейшем эффект чернения уменьшается.

## Глава V. АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

### § 1. ОРГАНИЗАЦИЯ И ЗАДАЧИ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Агрометеорологическое обслуживание всех отраслей сельскохозяйственного производства является одной из главных задач гидрометеорологической службы СССР. Гидрометеорологический Центр СССР обслуживает центральные организации союзного и республиканского (РСФСР) значения. В союзных республиках центральные органы обслуживаются оперативными подразделениями местных УГМС. Областные (краевые) организации обслуживаются гидрометеорологическими бюро. Наконец, гидрометеорологические станции и посты ведут агрометеорологическое обслуживание районных организаций, колхозов и совхозов.

Основная задач агрометеорологического обслуживания состоит в определении степени соответствия климатических и погодных условий района требованиям сельскохозяйственных растений и животных, в обосновании рационального использования климатических ресурсов. Важным элементом агрометеорологического обслуживания является оценка вероятности повреждения сельскохозяйственных растений неблагоприятными условиями (заморозками, засухами, пыльными бурями и т. д.), а также оценка условий, обеспечивающих продуктивность животноводства.

Основные виды и формы обслуживания сельского хозяйства следующие:

1. Метеорологические прогнозы различной заблаговременности, в том числе долгосрочные — на месяц и сезон.

2. Предупреждения об опасных явлениях погоды. Эта информация включается в прогноз погоды или сообщается немедленно при обнаружении угрозы опасных явлений.

3. Гидрологические прогнозы, включающие прогнозы запасов воды в реках и водохранилищах, из которых берется вода для орошения полей. Они имеют особенно важное значение в районах орошаемого земледелия.

4. Агрометеорологические информации о сложившихся погодных условиях и их влиянии на развитие и формирование урожая

сельскохозяйственных культур, проведение полевых работ, выпас скота на пастбищах.

5. Агрометеорологические прогнозы — долгосрочные прогнозы условий произрастания сельскохозяйственных культур, их урожая, темпов развития и др.

Остановимся более подробно на видах агрометеорологического обслуживания сельского хозяйства.

## § 2. АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИИ

Существует несколько видов агрометеорологических информаций, а именно: ежедневный гидрометеорологический бюллетень; пятидневные, недельные и декадные обзоры (бюллетени); специальные справки; агрометеорологические обзоры за вегетационный период: агроклиматические информаций.

Ежедневные гидрометеорологические бюллетени издаются Гидрометцентром СССР, республиканскими бюро погоды, областными гидрометеорологическими бюро и обсерваториями, а также метеорологическими станциями. В них содержатся обзоры погоды и агрометеорологических условий за прошедшие сутки на территории, обслуживаемой учреждением, издающим бюллетень. Этот бюллетень включает сведения о влажности почвы, состоянии сельскохозяйственных культур, предупреждения об опасных явлениях и прогноз погоды на сутки.

Агрометеорологические справки составляются всеми учреждениями гидрометслужбы, осуществляющими метеорологические и агрометеорологические наблюдения и оперативное обслуживание сельского хозяйства. В справках анализируются аномальные явления погоды, влияющие на состояние сельскохозяйственных культур. Содержание справок меняется в зависимости от условий погоды, они часто включают рекомендации по проведению различных агротехнических мероприятий.

Декадные агрометеорологические бюллетени издаются Гидрометцентром СССР, бюро погоды и гидрометеорологическими бюро. Они содержат анализ агрометеорологических особенностей декады с указанием аномальных явлений, как благоприятствующих, так и неблагоприятствующих развитию растений. Во втором разделе дается характеристика условий роста и развития основных сельскохозяйственных культур, оценка условий проведения полевых работ, приводится анализ изменения состояния культур по сравнению с предыдущей декадой и выявляются его причины. В третьем разделе помещаются таблицы и картограммы, характеризующие метеорологические условия декады.

Агроклиматические информаций содержат сведения о среднем многолетнем режиме отдельных территорий с учетом микроклиматических условий. Существует несколько видов агроклиматических информаций: агроклиматические справочники по областям; издаваемые в последние годы универсальные спра-

вочники «Агроклиматические ресурсы области»; работы по агроклиматическому районированию отдельных сельскохозяйственных культур. Важное значение имеют работы по микроклиматической оценке территорий. Примером такого исследования является монография «Микроклимат СССР» (Л., Гидрометеиздат, 1967). В ней выполнено микроклиматическое районирование территории СССР с учетом рельефа местности, степени ее изрезанности, крутизны склонов их экспозиции, заболоченности, наличия водоемов, облесенности, типа почв и т. д.

Помимо рассмотренных видов информации существуют и другие, а именно: агрометеорологические обзоры по радио и телевидению; консультации производственным организациям; агрометеорологические и метеорологические обзоры в местных газетах и т. д.

Особое место занимают информации для отгонного животноводства. Специфика отгонного животноводства требует специальных информации, содержащих сведения о тех гидрометеорологических условиях, которые определяют состояние пастбищ, условия выпаса скота, погоду на трассах его перегона и т. д. Обслуживанием отгонного животноводства занимаются все подразделения гидрометеослужбы в Средней Азии, Забайкалье, на Крайнем Севере, Черных Землях, Кизлярских пастбищах, в Закавказье.

### § 3. АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

Агрометеорологические прогнозы представляют собой предвидение или предвычисление агрометеорологических элементов и характеристик, влияющих на скорость роста, развития растений, их урожайность. Они составляются с различной заблаговременностью, иногда за два-три месяца до наступления прогнозируемого комплекса условий. Методы составления агрометеорологических прогнозов в большинстве случаев базируются на учете сложившихся агрометеорологических условий, выявлении показателей, которые медленно меняются во времени и оказывают определяющее влияние на дальнейшее состояние растений. Эти показатели называются инерционными факторами. С применением инерционных факторов уменьшается степень зависимости точности агрометеорологических прогнозов от точности долгосрочного прогноза погоды, в частности прогноза температуры воздуха и суммы осадков. В настоящее время в СССР составляется несколько десятков видов агрометеорологических прогнозов, некоторые из них приведены ниже.

#### Прогноз фаз развития и сроков созревания зерновых культур

Количество и качество урожая зависит от агрометеорологических условий в периоды произрастания, созревания и уборки зерновых культур. Несвоевременная уборка приводит к потерям,

а иногда и гибели урожая. В связи с этим очень важно заранее определить и предупредить хозяйства о сроках начала уборки различных видов зерновых культур. Поэтому особенно ценным является своевременный и достаточно точный прогноз наступления фаз восковой и полной спелости зерновых культур. Наступление восковой спелости означает время, когда можно начать раздельную уборку хлебов, а наступление полной спелости — время их прямого комбайнирования. Таким образом, период от восковой до полной спелости характеризует продолжительность периода раздельной уборки хлебов.

В основу прогноза фаз развития сельскохозяйственных культур и сроков созревания положена зависимость продолжительности межфазного периода от температуры воздуха. Эта зависимость выражается формулой

$$n = \frac{A}{t - t_{б.м}}, \quad (77)$$

где  $n$  — продолжительность межфазного периода;  $A$  — средняя сумма эффективных температур, необходимая сельскохозяйственной культуре для прохождения определенного межфазного периода;  $t$  — среднесуточная температура воздуха за межфазный период;  $t_{б.м}$  — биологический минимум температуры.

Средние значения суммы эффективных температур  $A$  за различные межфазные периоды вычислены А. А. Шиголевым. Вычисление даты наступления восковой спелости сводится к определению времени, необходимого для накопления суммы эффективных температур в межфазный период, т. е. к вычислению по формуле

$$D = D_0 + \frac{A}{t - t_{б.м}}, \quad (78)$$

где  $D$  — ожидаемый срок наступления фазы восковой спелости;  $D_0$  — дата наступления исходной фазы, в данном случае — фазы колошения (выметывания);  $A$  — сумма эффективных температур за период колошения (выметывание) — восковая спелость;  $t - t_{б.м}$  — средняя эффективная температура, ожидаемая в межфазный период; эта величина вычисляется на основании долгосрочного прогноза температуры.

Формула (78) используется в тех случаях, когда прогнозируемый межфазный период меньше месяца и расчет производится в день наступления исходной фазы. Если сроки наступления фазы восковой спелости вычисляются через некоторое время после наступления исходной фазы, то следует принимать во внимание накопившуюся за данный отрезок времени сумму эффективных температур. В этом случае расчет следует производить по формуле

$$D = D_1 + \frac{A - \sum t_{эф}}{t - t_{б.м}}, \quad (79)$$

где  $D_1$  — дата составления прогноза;  $\Sigma t_{эф}$  — сумма эффективных температур за период от даты наступления исходной фазы до даты составления прогноза.

Переход от восковой спелости к полной характеризуется подсыханием зерна, уменьшением содержания в нем воды в 2—3 раза. Таким образом, в межфазный период ст восковой до полной спелости происходит интенсивное испарение влаги из зерна, зависящее в большой мере от метеорологических условий, в частности от дефицита упругости водяного пара. Поэтому в качестве показателя скорости подсыхания можно использовать дефицит упругости. Долгосрочный прогноз дефицита упругости не составляется, для расчетов же следует использовать средние декадные многолетние его значения после даты наступления восковой спелости, уточненные по прогнозу температуры. Между отклонениями от среднего многолетнего значения температуры воздуха и дефицита упругости водяного пара существует зависимость, приведенная в табл. 24.

Таблица 24

Соотношение отклонения среднедекадных температур и дефицита упругости водяного пара, %

Метеорологические элементы	Отклонения								
	средние многолетние	выше нормы				ниже нормы			
Температура воздуха	100	10	20	30	40	10	20	30	40
Дефицит упругости водяного пара	100	15	30	45	60	15	30	45	60

Между дефицитом упругости водяного пара и суточной потерей влаги зерном также установлена количественная зависимость. Общий запас влаги в зерне в момент восковой спелости при этом принимается равным 100%. Дата наступления полной спелости определяется как момент, когда в процессе просыхания хлебов будут израсходованы 100% влаги.

### Прогноз сроков цветения плодовых культур

Большой вред плодовым культурам наносят заморозки в период их цветения. Поэтому прогноз сроков цветения плодовых культур составляется с целью своевременного принятия мер для борьбы с заморозками, а также для определения сроков применения химических методов борьбы с вредителями садов. Он составляется одновременно с прогнозом заморозков.

Анализ большого фактического материала показал, что плодовые культуры после зимних холодов начинают свое развитие при достижении среднесуточной температурой воздуха биологического минимума. Чтобы наступило цветение, плодовая культура должна накопить определенную сумму эффективных температур. Для сортов яблони, возделываемых на ЕТС, эта величина ( $A_1$ ) составляет  $185 \pm 10^\circ$ . Для прохождения фазы цветения требуется еще дополнительная сумма эффективных температур ( $A_2$ ). Для яблони она составляет  $125 \pm 15^\circ$ . Дата начала цветения вычисляется путем последовательного суммирования эффективных температур.

С момента перехода среднесуточной температуры через биологический минимум до даты составления прогноза накопится сумма эффективных температур  $\Sigma t_{\text{эф}}$ , которую следует исключить из требуемой суммы ( $185 \pm 10^\circ$ ). Оставшаяся сумма должна быть накоплена в последующий период путем суммирования прогнозируемых эффективных температур. В связи с этим дата начала цветения определяется как число, к которому будет накоплена сумма эффективных температур  $A_1$ . Далее определяется дата окончания цветения. При этом, начиная с даты начала цветения, суммируют прогнозируемые эффективные температуры до даты, когда будет накоплена сумма эффективных температур  $A_2$ . Зная ожидаемые сроки цветения яблони и имея прогноз заморозков, определяют вероятность повреждения цветущих деревьев заморозками.

#### Прогноз запасов продуктивной влаги в почве к началу вегетационного периода

Запасы продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы в начале вегетационного периода играют большую роль в формировании будущего урожая. Особенно велика их роль в засушливых районах, где летние осадки малы. Здесь крайне важно иметь своевременный прогноз запасов продуктивной влаги на весну. За момент начала весны обычно принимают дату перехода среднесуточной температуры воздуха через  $5^\circ \text{C}$ . В районах с достаточным или избыточным увлажнением почвы этот вид прогноза теряет смысл и его не составляют.

На Европейской территории СССР ведущими факторами в изменении запасов почвенной влаги в холодную часть года являются осадки, выпавшие за этот период, и недостаток насыщения почвы влагой к началу зимы. В зависимости от этих факторов и установлены закономерности изменения запасов влаги за период осень—зима—весна. Проникновение осадков в почву зависит от характера зимы. При частых оттепелях вода постепенно проникает в почву и весенний сток бывает мал. Поэтому, чтобы определить ожидаемые запасы влаги в корнеобитаемом слое почвы, следует учесть характер зимы: устойчива она или неустойчива.

Вычисление запасов влаги к началу вегетационного периода производится по уравнениям, предложенным Л. А. Разумовой. Ожидаемые запасы вычисляются по формуле

$$\omega_{\text{вс}} = \omega_{\text{ос}} + \Delta\omega, \quad (80)$$

где  $\omega_{\text{ос}}$  — запас продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы осенью;  $\Delta\omega$  — изменение запасов продуктивной влаги за осенне-зимний период, т. е. от даты измерения влажности осенью до момента перехода температуры воздуха через  $5^\circ\text{C}$ .

За  $\omega_{\text{ос}}$  берется значение, которое было в талой почве ближе всего к моменту её замерзания. На станциях, находящихся в зоне с неустойчивой зимой, за исходные осенние запасы влаги в почве принимают те, которые были определены близко к переходу температуры воздуха осенью через  $0^\circ\text{C}$ .

Величина  $\Delta\omega$  в районе с устойчивой зимой определяется по формуле

$$\Delta\omega = 0,115x + 0,56h - 20, \quad (81)$$

где  $x$  — сумма осадков от осеннего определения влажности почвы до момента перехода температуры воздуха через  $5^\circ\text{C}$ ;  $h$  — дефицит влажности почвы осенью.

Сумма осадков может быть выражена так:

$$x = x_1 + x_2, \quad (82)$$

где  $x_1$  — сумма осадков от осеннего определения влажности почвы до момента составления прогноза;  $x_2$  — сумма прогнозируемых осадков с момента составления прогноза до даты перехода температуры воздуха через  $5^\circ\text{C}$ .

Дефицит запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы вычисляется как разность между полевой влагоемкостью и осенними запасами влаги в почве, т. е.  $h = \omega_0 - \omega_{\text{ос}}$ . В районах с глубоким залеганием грунтовых вод, но неустойчивой зимой, для определения  $\Delta\omega$  используется уравнение

$$\Delta\omega = 0,21x + 0,62h - 33. \quad (83)$$

Прогноз составляется за 30—50 дней до посева зерновых культур.

#### Прогноз запасов продуктивной влаги в почве под сельскохозяйственными культурами в период их вегетации

Прогноз запасов продуктивной влаги в почве в период вегетации сельскохозяйственных культур имеет большое значение для оценки урожая. Он составляется по методу С. А. Вериго. В основу этого метода положены закономерности изменения запасов влаги в зависимости от четырех факторов:

1) метеорологических условий вегетационного периода; основными метеорологическими факторами при этом считаются температура воздуха и сумма осадков;

2) исходной влажности корнеобитаемого слоя почвы ( $\omega_{исх}$ ), характеризующей скорость усвоения почвой осадков;

3) степени развития корневой системы растений и потребности их во влаге в различные межфазные периоды;

4) типа почвы, определяющего процесс перемещения влаги в почве.

По методу С. А. Вериго расчет производится по декадам. Ожидаемая влажность почвы в конце декады ( $\omega_{ож}$ ) вычисляется по формуле

$$\omega_{ож} = \omega_{исх} + \Delta\omega, \quad (84)$$

где  $\Delta\omega$  — изменение запасов продуктивной влаги в почве в течение декады;  $\omega_{исх}$  — запас продуктивной влаги в метровом слое в начале декады.

Величина  $\Delta\omega$  вычисляется на основании учета указанных выше четырех факторов по уравнению

$$\Delta\omega = At + Bx + D\omega_{исх} + C, \quad (85)$$

где  $t$  — прогнозируемая среднедекадная температура воздуха;  $x$  — прогнозируемая сумма осадков за декаду;  $\omega_{исх}$  — запасы влаги в начале декады.

Эмпирические коэффициенты  $A, B, D, C$  зависят от типа почвы и фазы развития растений (их значения приведены в табл. 25).

Таблица 25

Значения коэффициентов, входящих в уравнение (85)

Период формирования	Слой, почвы, см	Тип почвы							
		Черноземная				Оподзоленная			
		Значение коэффициентов							
		A	B	D	C	A	B	D	C
Листьев	0—20	-0,10	0,35	-0,28	0,9	-0,54	0,22	-0,20	7,6
	0—100	-0,27	0,78	-0,127	2,0	0,40	1,24	-0,314	2,5
Колоса и цветка	0—100	0,07	0,93	-0,176	-20,6	-1,53	0,51	-0,128	17,7
Зерна	0—100	-1,72	1,08	-0,229	23,3	-0,93	0,64	-0,090	10,8

При составлении прогноза с заблаговременностью более 10 дней расчет производится последовательно по декадам. При этом за исходный запас влаги в начале каждой последующей декады принимается запас влаги, полученный расчетным путем на конец предыдущей декады.

## Прогноз норм орошения, сроков и норм полива зерновых культур

В СССР значительная часть площади, занятой сельскохозяйственными культурами (в том числе и зерновыми), расположена в засушливой зоне. Высокие урожаи здесь можно получить только при орошении. Предвычисление режима орошения состоит из расчета нормы орошения (т. е. количества воды, которое необходимо подать на 1 га поля за вегетационный период) и определения сроков и норм поливов (распределения полученной ранее нормы орошения во времени). Нормы орошения и поливы должны быть достаточными для промывания всего корнеобитаемого слоя. При этом количество поданной на поле воды должно строго лимитироваться во избежание подъема грунтовых вод, приводящего к засолению почв.

### Расчет и прогноз норм орошения

Норма орошения ( $N$ ) может быть рассчитана как разность между количеством воды, требуемым посевом за вегетационный период ( $Q$ ), которое называется влагопотребностью, и суммарным расходом воды, обеспечиваемым естественными условиями увлажнения ( $Q_1$ ) т. е.

$$N = Q - Q_1. \quad (86)$$

Компоненты формулы (86) могут быть определены разными способами.

1) Величины  $Q$  и  $Q_1$  вычисляются по метеорологическим данным. В § 3 гл. II рассматривается способ расчета влагопотребности растений по испаряемости. Влагопотребность может быть вычислена так:

$$Q = k \cdot E_0, \quad (87)$$

где  $k$  — биологический коэффициент;  $E_0$  — испаряемость за вегетационный период.

В степных и полупустынных районах СССР грунтовые воды залегают на значительной глубине (3—5 м и более) и влияние их на влажность корнеобитаемого слоя мало. В связи с этим растения в течение вегетационного периода расходуют влагу, имеющуюся в почве к началу сева и проникающую в корнеобитаемый слой при выпадении летних осадков. Обычно к концу вегетационного периода на неорошаемых полях запас продуктивной влаги близок к влажности завядания. Следовательно, можно считать, что весь имеющийся в корнеобитаемом слое запас продуктивной влаги в течение вегетационного периода расходуется на суммарное испарение, т. е. равен его сумме за тот же период. Обозначив сумму испарения за вегетационный период через  $E$ , запишем формулу для вычисления нормы орошения:

$$N = kE_0 - E. \quad (88)$$

2) Исследования Л. А. Разумовой и Н. Б. Мещаниновой, выполненные в ГМЦ СССР по материалам Кулундинской степи, Северного Кавказа и Поволжья, позволили несколько иначе подойти к определению норм орошения. На основании экспериментальных данных установлена связь между урожаем зерновых культур и суммарными затратами воды для орошения. Эта связь выражается зависимостью

$$Y = a \cdot Q - b, \quad (89)$$

где  $Y$  — урожай, ц/га;  $Q$  — суммарный расход влаги на испарение при оптимальном увлажнении почвы в результате орошения, мм;  $a$ ,  $b$  — эмпирические коэффициенты.

Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  приведены в табл. 26. Там же указаны пределы применения уравнения (89).

Таблица 26

Связь урожая и суммарного расхода влаги при орошении для условий Северного Кавказа и Поволжья

Сорт пшеницы	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Ошибка уравнения	Пределы применения	
				ц/га	мм
Альбидум-3700	$Y = 0,090Q - 6,8$	$0,94 \mp 0,01$	$\pm 2,3$	5—43	130—470
Лютесценс-062	$Y = 0,103Q - 8,1$	$0,91 \mp 0,02$	$\pm 2,5$	4—44	150—470

Величина  $Q_1$  в естественных условиях увлажнения определяется по упрощенному уравнению водного баланса почвы

$$Q_1 = (\omega_1 - \omega_2) + x, \quad (90)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — продуктивная влажность метрового слоя почвы соответственно в период посева и в момент массового наступления восковой спелости;  $x$  — осадки за вегетационный период.

Расчет нормы орошения можно производить как для средних многолетних условий, так и для конкретного года. При расчете для конкретного года запас влаги в метровом слое весной берется по данным измерений, а при их отсутствии используются данные прогноза. Осадки берутся по прогнозу, а величина  $\omega_2$  вычисляется. Поскольку запас продуктивной влаги в метровом слое почвы в засушливых районах в конце вегетационного периода обычно мал и приближается к нулю, то расчет нормы орошения на конкретный год можно проводить, учитывая отклонения от средних многолетних значений запасов влаги в момент сева зерновых культур и суммы осадков за вегетационный период, т. е.

$$N_K = N_0 + (\omega_{1,мн} - \omega_{1,к}) + (x_{мн} - x_k), \quad (91)$$

где  $N_0$  и  $N_k$  — нормы орошения соответственно среднесуточными и за конкретный год;  $\omega_{1,мн}$  и  $\omega_{1,к}$  — запас продуктивной влаги в метровом слое почвы соответственно для средних многолетних условий и в конкретный год;  $x_{мн}$  и  $x_k$  — сумма осадков за вегетационный период для средних многолетних условий и за конкретный год.

### Прогноз сроков и норм полива

Режим орошения можно считать оптимальным, если запас продуктивной влаги в корнеобитаемом слое в течение периода вегетации не поднимается выше полевой влагоемкости и не опускается до значений меньше 70% от нее. Исключение составляет период созревания зерна, когда во избежание грибковых заболеваний норма последнего полива устанавливается из расчета, чтобы к концу восковой спелости запасы продуктивной влаги в метровом слое не превышали 40 мм, т. е. были несколько ниже 70% полевой влагоемкости.

После посева влажность почвы начинает уменьшаться за счет испарения с поверхности, а после появления всходов — и в результате транспирации. Момент снижения запасов влаги до 70% полевой влагоемкости можно принять за дату первого, а затем последующих поливов. Изменение запасов влаги в почве вычисляется по уравнению

$$\Delta\omega = A \cdot \omega_1 + Bt + Cx + D, \quad (92)$$

где  $\Delta\omega$  — изменение запасов продуктивной влаги в почве за сутки, мм;  $\omega_1$  — запас продуктивной влаги к началу расчетного периода, мм;  $t$  — среднесуточная температура воздуха, °C;  $x$  — сумма осадков за сутки, мм;  $A, B, C, D$  — эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 27.

Таблица 27

Значение коэффициентов  $A, B, C, D$ , входящих в уравнение (92), в период выход в трубку — восковая спелость

Тип почв	$A$	$B$	$C$	$D$	Коэффициент корреляции
Легкие супесчаные и суглинистые	-0,046	-0,26	0,60	4,01	0,76 ± 0,04
Среднесуглинистые и глинистые	-0,03	-0,26	0,46	5,9	0,86 ± 0,08

Расчет изменения запасов влаги производится по пентадам. Для предвычисления режима орошения на больших площадях удобно пользоваться графиками, построенными на основании

уравнения (92). Норма полива ( $N_{\text{п}}$ ) вычисляется как разность между полевой влагоемкостью и прогнозируемым на день полива запасом продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы ( $\omega$ ):

$$N_{\text{п}} = \omega_0 - \omega. \quad (93)$$

Вычисления обычно выполняются для слоя почвы глубиной 1 м.

### Прогноз средней областной урожайности озимой пшеницы в Черноземной зоне ЕТС

Почвы Черноземной зоны ЕТС богаты питательными веществами. Здесь вполне достаточно света и тепла для созревания озимой пшеницы. Поэтому средняя областная урожайность ее будет определяться запасами продуктивной влаги в почве и условиями перезимовки, результатом которых является число стеблей, сохранившихся к весне. Методика прогноза средней областной урожайности озимой пшеницы в Черноземной зоне разработана Е. С. Улановой.

Анализ многолетних данных позволил Е. С. Улановой установить, что средняя областная урожайность озимой пшеницы на Украине, Северном Кавказе, в Молдавии и Нижнем Поволжье зависит от весенних запасов влаги. Осадки апреля—июня незначительно сказываются на средней областной урожайности, их необходимо учитывать лишь в годы с осенне-зимними засухами. Число стеблей весной определяется условиями осенне-зимнего периода. При благоприятных осенне-зимних условиях весной на 1 м<sup>2</sup> посевов насчитывалось 1000—2000 стеблей, при неблагоприятных — меньше 1000.

Зависимость средней областной урожайности озимой пшеницы сортов Безостая-1 и Мироновская-808 от весенних запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы с учетом числа стеблей на 1 м<sup>2</sup> для черноземных районов выражается соответственно следующими уравнениями:

$$Y = -0,001 \omega^2 + 0,382 \omega - 13,0; \quad (94)$$

$$Y = -0,001 \omega^2 + 0,370 \omega - 8,65, \quad (95)$$

где  $Y$  — урожайность озимой пшеницы, ц/га;  $\omega$  — запасы продуктивной влаги, мм, под озимой пшеницей в метровом слое почвы в декаду последнего перехода среднедекадной температуры воздуха через +5°С весной.

Уравнения (94) и (95) можно использовать при запасах продуктивной влаги в метровом слое почвы 60—250 мм, причем уравнение (94) используется при числе стеблей озимой пшеницы весной 500—1000 на 1 м<sup>2</sup>, а уравнение (95) — 1000—1800 на 1 м<sup>2</sup>.

По этим уравнениям рассчитывается наиболее вероятная средняя областная урожайность озимой пшеницы. Потребителю же требуются не только наиболее вероятные показатели средней

областной урожайности, но и возможные их отклонения. Согласно многолетним фактическим данным, при благоприятных летних условиях урожайность озимой пшеницы в среднем по области увеличивается на 3 ц/га, при неблагоприятных — уменьшается в среднем на 3 ц/га, т. е.

$$Y_6 = Y + 3, \quad (96)$$

$$Y_n = Y - 3, \quad (97)$$

где  $Y_6$  — средняя областная урожайность при благоприятных летних условиях, ц/га;  $Y_n$  — средняя областная урожайность озимой пшеницы при неблагоприятных условиях, ц/га;  $Y$  — наиболее вероятная средняя областная урожайность озимой пшеницы.

Прогнозы средней областной урожайности озимой пшеницы по Черноземной зоне составляются весной после устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через  $+5^\circ\text{C}$  с трехмесячной заблаговременностью.

### Прогноз выпревания озимых культур

Выпревание является результатом длительного пребывания растений под мощным снежным покровом при сравнительно высокой температуре (близкой к  $0^\circ\text{C}$ ). Растения, не получая солнечной радиации, быстро расходуют на дыхание накопленные осенью питательные вещества, истощаются и подвергаются грибковым заболеваниям. Установлено, что чаще всего выпревание наблюдается в случаях, когда снежный покров высотой  $> 30$  см при глубине промерзания почвы менее 50 см залегает более 5 декад.

Различают следующие условия перезимовки: хорошие, когда высокий снежный покров залегает на полях менее 5 декад, удовлетворительные — 5—8 декад, неудовлетворительные — 9—11, плохие — 12—14, очень плохие — 15 или более декад. Следовательно, чтобы оценить условия перезимовки, необходимо предвычислить продолжительность залегания высокого снежного покрова. Она вычисляется на основании связи со сроком установления снежного покрова высотой  $\geq 30$  см по уравнению

$$n = 17,540 - 1,126 D, \quad (98)$$

где  $n$  — продолжительность залегания снежного покрова высотой  $\geq 30$  см, декады;  $D$  — срок установления снежного покрова высотой  $\geq 30$  см, декады (подсчет их ведется с первой декады ноября, которая принимается равной единице).

При длительном пребывании озимых культур под высоким снежным покровом, способствующем выпреванию, число живых стеблей уменьшается. Связь между продолжительностью залегания снега и количеством сохранившихся за зиму стеблей выражается уравнением

$$P = 123,0 - 5,4 n, \quad (99)$$

где  $P$  — количество сохранившихся за зиму стеблей (отношение количества стеблей на  $1 \text{ м}^2$  при весеннем и осеннем обследованиях посевов, %;  $n$  — продолжительность залегания снежного покрова высотой  $\geq 30$  см (декады). Высокий снежный покров хотя значительно и уменьшает колебания температуры на глубине узла кушения вследствие изменения теплопроводности, но не исключает их. Поэтому в расчеты по уравнению (99) следует вводить поправку на температуру. Для нахождения ее необходимо знать продолжительность залегания снежного покрова высотой  $\geq 30$  см и сумму среднесуточных температур воздуха за этот период, которая, в то же время связана с суммой его среднесуточных температур за период залегания снежного покрова высотой  $1 - 30$  см.

Изреженность посевов весной от выпревания зависит от степени развития озимых культур к моменту прекращения осенней вегетации. Это обстоятельство учитывается при вычислении количества сохранившихся весной стеблей.

Итак, метод прогноза выпревания основан на количественных зависимостях состояния растений весной от состояния их осенью, температуры воздуха и почвы на глубине узла кушения, глубины промерзания почвы, высоты и продолжительности залегания снежного покрова. В зависимости от соотношения количества стеблей осенью и сохранившихся к весне определяется площадь полей, на которых произойдет гибель посевов от выпревания.

### Прогноз вымерзания озимых культур

Прогноз вымерзания озимых культур сводится к прогнозу критических температур почвы на глубине узла кушения и определению площадей возможного вымерзания. Существующие теоретические схемы расчета температуры почвы в практике обслуживания сельского хозяйства почти не используются, так как расчеты по ним сложны и трудоемки и не могут выполняться в стационарных условиях. Поэтому прогноз вымерзания обычно составляется с помощью эмпирических формул, например по уравнениям, разработанным В. А. Моисейчик.

В. А. Моисейчик предположила, что температура почвы на глубине залегания узла кушения зависит от температуры воздуха, высоты снежного покрова и глубины промерзания почвы. Эта связь выражается уравнением

$$T_{\text{п}} = A \cdot T_{\text{в}} - B \cdot h + C, \quad (100)$$

где  $T_{\text{п}}$  — минимальная температура почвы на глубине узла кушения озимых культур, °С;  $T_{\text{в}}$  — минимальная температура воздуха, °С;  $h$  — глубина промерзания почвы, см;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — эмпирические коэффициенты (табл. 28), зависящие от высоты снежного покрова.

Коэффициенты, входящие в уравнение (100), при разных высотах снежного покрова на юго-востоке Черноземной зоны ЕСС

Высота снежного покрова, см	Коэффициенты		
	A	B	C
5	0,64	0,07	5,2
10	0,25	0,06	0,48
15	0,17	0,06	1,9
20	0,12	0,05	1,56

Количественные зависимости получены и для других районов СССР. Практически при снежном покрове высотой более 10 см температура на глубине узла кушения редко бывает ниже критического значения. Обычно снежный покров залегает неравномерно, поэтому для прогноза вымерзания нельзя пользоваться только его средней высотой. Необходимо учитывать, что при достаточно большой средней высоте снежного покрова на значительных площадях она может быть недостаточной для защиты растений от вымерзания.

Оценка предполагаемых агрометеорологических условий перезимовки основывается также на закономерностях изменения высоты снежного покрова и глубины промерзания, которые вычисляются на основании прогноза температуры воздуха и сумм осадков. Изменение высоты снежного покрова за декаду ( $\Delta h$  см) выражается формулой

$$\Delta h = \frac{x}{10 \cdot d}, \quad (101)$$

где  $x$  — сумма осадков за декаду, мм;  $d$  — плотность снежного покрова, г/см<sup>3</sup>.

Для оценки изменения глубины промерзания используются ее зависимости от высоты снежного покрова и суммы отрицательных среднесуточных температур за декаду.

#### § 4. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ОТРАСЛЕЙ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Различные отрасли сельского хозяйства имеют свою специфику, что определяет некоторую специализацию их обслуживания. Действительно, зерновое хозяйство, хлопководство, садоводство, орошаемое земледелие, отгонно-пастбищное животноводство, оленеводство требуют от агрометеорологии различных справок, информации, прогнозов.

В области зернового хозяйства разработаны индивидуальные мегоды для оценки состояния и прогноза урожайности разных культур, например пшеницы (яровой и озимой), кукурузы, подсолнечника и т. д. Кроме того, для зерновых культур дается оценка метеорологических условий периода уборки урожая и обоснование способов их уборки в зависимости от погоды.

Для садоводства особое значение имеет прогноз заморозков, который составляется параллельно с прогнозом фазы цветения.

Орошаемое земледелие потребовало разработки способов расчета и прогноза норм орошения, сроков и норм полива. Одновременно требуется информация и прогнозы водности рек и водохранилищ, из которых берется вода для орошения, данные об уровне залегания грунтовых вод, о влажности почвы на орошаемых участках.

Большие требования к агрометеорологическому обслуживанию предъявляет отгонное животноводство. Здесь необходимы сведения о метеорологических условиях, влияющих как на формирование пастбищной растительности, так и на животных. Особое значение имеет прогноз неблагоприятных для отгонного животноводства метеорологических условий, например высокого снежного покрова, ледяной корки и т. д.

В последние годы в СССР развиваются работы по агрометеорологическому обслуживанию оленеводства. Основной особенностью оленеводства является круглогодичное содержание животных на подножном корму в суровых условиях Крайнего Севера без строительства специальных укрытий и заготовки кормов. В этой области хозяйства важна информация о высоте, характере распределения и плотности снежного покрова, ледяной корке, высоких и низких температурах, осадках, метелях, сильном ветре, состоянии пастбищной растительности и т. д.

В дальнейшем намечается еще большая дифференциация в обслуживании отдельных отраслей сельского хозяйства.

## **§ 5. РАБОТА СЕТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОСТОВ ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ КОЛХОЗОВ И СОВХОЗОВ**

Агрометеорологическое и метеорологическое обслуживание колхозов и совхозов, районных организаций осуществляется гидрометеорологическими станциями, а также метеорологическими и агрометеорологическими постами. На каждой станции составляется план, в котором указываются виды обслуживания (прогнозы, справки, предупреждения и др.) и способы доведения их до потребителя. План включает схему обслуживания, где изображены связи станции со всеми обслуживаемыми организациями. Содержание агрометеорологических информаций ежегодно уточняется с учетом особенностей сельскохозяйственного года. В агрометеорологических информациях станций содержатся результаты на-

блюдений, характеризующие агрометеорологические условия и состояние сельскохозяйственных культур, прогнозы, рекомендации по конкретным полям, с учетом особенностей хозяйства, почвенных условий, микроклиматических особенностей.

Гидрометеорологические станции и посты составляют ежедневные и декадные бюллетени. Ежедневная сводка агрометеорологического поста содержит данные о температуре воздуха и сумме осадков за истекшие сутки, сумме среднесуточных температур с начала весны, об увлажнении почвы, о состоянии сельскохозяйственных культур, снежном покрове. В сводку включается прогноз погоды на ближайшие сутки. Декадный агрометеорологический бюллетень включает те же сведения за декаду (форма ТСХ-8). В агрометеорологической информации содержатся рекомендации по проведению агротехнических мероприятий с учетом сложившихся агрометеорологических условий. Заметное место в обслуживании гидрометеорологическими станциями сельского хозяйства занимает сообщение заинтересованным организациям прогнозов погоды. Некоторые виды прогнозов, например прогноз заморозков, уточняются на станции с учетом микроклиматических особенностей полей и характера сельскохозяйственных культур. Кроме этого на гидрометеорологических станциях составляются некоторые виды агрометеорологических прогнозов, в основу которых положены материалы наблюдений данной станции.

Внедрение агрометеорологических материалов в сельскохозяйственное производство способствует ведению его на более высокой научной основе и повышению продуктивности.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатъев А. М. Влагооборот культурных растений. Л., Гидрометеоздат, 1954. 273 с.
2. Берлянд М. Е., Красиков П. Н. Предсказание заморозков и борьба с ними. Л., Гидрометеоздат, 1960. 145 с.
3. Будыко М. И. Климат и жизнь. Л., Гидрометеоздат, 1971. 472 с.
4. Бучинский И. Е., Засухи и суховеи. Л., Гидрометеоздат, 1976. 213 с.
5. Вериго С. А., Разумова Л. А. Почвенная влага (применительно к запросам сельского хозяйства). Л., Гидрометеоздат, 1973. 328 с.
6. Гольцберг И. А. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними. Л., Гидрометеоздат, 1961. 199 с.
7. Давитая Ф. Ф. Прогноз обеспеченности теплом и некоторые проблемы сезонного развития природы. М., Гидрометеоздат, 1964. 132 с.
8. Ефимова Н. А. Радиационные факторы продуктивности растительного покрова. Л., Гидрометеоздат, 1977. 215 с.
9. Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. Под ред. А. И. Руденко. Л., Гидрометеоздат, 1958. 207 с.
10. Константинов А. Р. и др. Методы расчета испарения с сельскохозяйственных полей. Л., Гидрометеоздат, 1971. 126 с.
11. Константинов А. Р., Струзер Л. Р. Лесные полосы и урожай. Л., Гидрометеоздат, 1974. 213 с.
12. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеоздат, 1961. 340 с.
13. Лекции по сельскохозяйственной метеорологии. Под ред. М. С. Кулика, В. В. Синельщикова. Л., Гидрометеоздат, 1966. 262 с.
14. Личикаки В. М. Методические указания по оценке влияния ледяной корки на перезимовку озимой пшеницы. Л., Гидрометеоздат, 1970. 72 с.
15. Микроклимат СССР. Под ред. И. А. Гольцберг. Л., Гидрометеоздат, 1967. 286 с.
16. Моисейчик В. А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. Л., Гидрометеоздат, 1975. 295 с.
17. Муминов Ф. А. Тепловой баланс и формирование урожая хлопчатника. Труды САНИГМИ, 1970, вып. 50/65, с. 3—247.
18. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 11, Л., Гидрометеоздат, 1973. 285 с.
19. Пенман Х. Л. Растения и влага. Л., Гидрометеоздат, 1968. 161 с.
20. Разумова Л. А., Мещанинова Н. Б. Методическое пособие по составлению прогнозов оптимальных режимов орошения зерновых культур. М., Гидрометеоздат, 1972. 90 с.
21. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т. I. Водные свойства почв и передвижение почвенной влаги. Л., Гидрометеоздат, 1965. 663 с.

22. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. Л., Гидрометеоиздат, 1975. 341 с.
23. Руднев Г. В. Агрометеорология. Л., Гидрометеоиздат, 1973. 341 с.
24. Руководство по определению агрогидрологических свойств почвы на гидрометеостанциях. М., Гидрометеоиздат, 1964. 124 с.
25. Руководство по проведению визуальных авиамаршрутных агрометеорологических обследований. М., Гидрометеоиздат, 1971. 64 с.
26. Руководство по контролю и обработке наблюдений над влажностью и промерзанием почвы. Л., Гидрометеоиздат, 1955. 80 с.
27. Руководство по составлению агрометеорологических прогнозов. Л., Гидрометеоиздат, 1962. 269 с.
28. Русин Н. П. Климат сельскохозяйственных полей. Л., Гидрометеоиздат, 1955. 75 с.
29. Серякова Л. П., Петрушенко В. Д. Сборник заданий по курсу «Агрометеорология», Л., ЛГМИ, 1976. 136 с.
30. Синицина Н. И., Гольцберг И. А., Струнников Э. А. Агроклиматология. Л., Гидрометеоиздат, 1973. 341 с.
31. Смирнова С. И. Суховеи в степях Нижнего Дона и Северного Кавказа. Л., Гидрометеоиздат, 1976. 138 с.
32. Уланова Е. С. Методы агрометеорологических прогнозов. Л., Гидрометеоиздат, 1959. 280 с.
33. Утешев А. С. Атмосферные засухи и их влияние на природные явления. Алма-Ата, изд-во «Наука» Казахской ССР, 1972. 175 с.
34. Федосеев А. П. Климат и пастбищные травы Казахстана. Л., Гидрометеоиздат, 1964. 317 с.
35. Хильми Г. Ф. Энергетика и продуктивность растительного покрова суши. Л., Гидрометеоиздат, 1976. 60 с.
36. Циприс Д. Б., Ревут В. И. Орошение и мульчирование на северо-западе Европейской территории СССР. Л., Гидрометеоиздат, 1974. 144 с.
37. Цубербиллер Е. А. Агроклиматическая характеристика суховесв. Л., Гидрометеоиздат, 1959. 120 с.
38. Чирков Ю. И. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Л., Гидрометеоиздат, 1975. 214 с.
39. Шаратов Н. И., Смирнов В. А. Климат и качество урожая. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 126 с.
40. Шульгин А. М. Климат почвы и его регулирование. Л., Гидрометеоиздат, 1967. 299 с.
41. Шульгин И. А. Растение и солнце. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 249 с.
42. Яковлев Н. Н. Климат и зимостойкость озимой пшеницы. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 396 с.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Глава I. Введение . . . . .	3
§ 1. Предмет, задачи и методы исследования агрометеорологии . . . . .	3
§ 2. Агрометеорологические наблюдения . . . . .	7
Глава II. Значение метеорологических условий в сельскохозяйственном производстве . . . . .	10
§ 1. Роль солнечной радиации в жизни растений . . . . .	11
§ 2. Роль тепла в жизни растений . . . . .	27
§ 3. Роль воды в жизни растений . . . . .	37
§ 4. Роль в сельскохозяйственном производстве метеорологических элементов, оказывающих косвенное влияние на растения . . . . .	72
Глава III. Метеорологический режим среди растений . . . . .	77
§ 1. Понятие о фитоклимате . . . . .	77
§ 2. Радиационный режим травостоя . . . . .	78
§ 3. Тепловой баланс поля . . . . .	80
§ 4. Температура и влажность воздуха в травостое . . . . .	83
§ 5. Влияние растительного покрова на температуру почвы . . . . .	88
§ 6. Влияние обработки почвы и способов агротехники на метеорологический режим приземного слоя воздуха . . . . .	89
§ 7. Фитоклимат орошаемых полей . . . . .	91
Глава IV. Неблагоприятные для сельского хозяйства метеорологические и гидрологические явления и меры борьбы с ними . . . . .	94
§ 1. Засухи и суховеи . . . . .	94
§ 2. Пыльные бури. Выдувание посевов . . . . .	109
§ 3. Град . . . . .	116
§ 4. Заморозки . . . . .	119
§ 5. Основные факторы, определяющие перезимовку озимых культур . . . . .	128
§ 6. Вымерзание посевов . . . . .	130
§ 7. Выпревание посевов . . . . .	133
§ 8. Вымокание посевов . . . . .	135
§ 9. Ледяная корка . . . . .	136
Глава V. Агрометеорологическое обслуживание сельского хозяйства СССР . . . . .	139
§ 1. Организация и задачи агрометеорологического обслуживания сельского хозяйства . . . . .	139
§ 2. Агрометеорологические информации . . . . .	140
§ 3. Агрометеорологические прогнозы . . . . .	141
§ 4. Специализированное обслуживание отдельных отраслей сельского хозяйства . . . . .	153
§ 5. Работа сети гидрометеорологических станций и постов по обслуживанию колхозов и совхозов . . . . .	154
Литература . . . . .	156