

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им.М.В.Ломоносова

Е.В.Шеин, В.М.Гончаров

# АГРОФИЗИКА

## **ВВЕДЕНИЕ**

Определение агрофизики. Основные физические правила и законы в применении к агрофизике.

Основные законы продукционного процесса.

## **Часть I. Физика почв.**

### **Глава I.1. Твердая фаза почв**

Плотность твердой фазы почвы, агрегатов, почвы

Агрофизическое значение плотности почвы

Гранулометрический состав

Методы определения гранулометрического состава почв

Структура почвы

Микроагрегатный состав почв

Структурный (макроагрегатный) состав почв

Физико-механические свойства почв

Деформация сжатия

Деформация сдвига

Сопротивление пенетрации

### **Глава I.2. Влажность и водные свойства почв**

Влажность почв

Почвенно-гидрологические константы

Давление почвенной влаги

### **Глава I.3. Движение воды и растворимых веществ в почве**

Фильтрация: движение воды в насыщенной влагой почве

Водопроницаемость. Впитывание (инфильтрация) воды в почву

Коэффициенты фильтрации и впитывания: экспериментальные определения и расчеты

Движение воды в не насыщенной влагой почве

Движение растворимых веществ в почве

### **Глава I.4. Теплофизические свойства почв**

Перенос тепла в почве. Основные механизмы

Теплофизические почвенные параметры: теплоемкость, температуропроводность

## **Часть II. Физика приземного слоя атмосферы (микроклиматология)**

Введение

### **Глава II.1. Радиационный и тепловой режимы**

Виды радиации. Радиационный баланс

Тепловой баланс

Фотосинтетически активная радиация - ФАР

Значение ветра

### **Глава II.2. Основные агрометеорологические характеристики**

Агроклиматические показатели

Агропрогнозы

    Прогноз фаз развития растения

    Агрометеопрогнозы тепло- и влагообеспеченности растений

Испарение, испаряемость и эвапотранспирация

    Метеорологические методы определения эвапотранспирации

    Определение испаряемости методами радиационного баланса

Экспериментальные методы определения эвапотранспирации  
 Рельеф как фактор агроклимата  
 Физические основы некоторых метеорологических явлений  
 Засуха  
 Суховеи  
 Измерение метеопараметров  
 Оценка элементов радиационного баланса (актинометрические наблюдения)  
 Об измерении скорости ветра  
 Измерение влажности воздуха

### **Глава II.3. Температура почвы и её значение для растений**

Температура почвы в периоды прорастания семян и роста растений  
 Зимние температуры почвы  
 Перезимовка растений  
 Классификация тепловых условий почвы  
 Прогноз температуры почвы  
 Регулирование температуры почвы

## **Часть III Агрофизика продукционного процесса в растениях**

Введение

### **Глава III.1. Фотосинтез и дыхание растений**

Фотосинтез  
 Влияние физических факторов на интенсивность фотосинтеза  
 Влияние интенсивности и спектрального состава света  
 Спектральный состав света  
 Влияние влажности почвы и температуры приземного воздуха на фотосинтез  
 Минеральное питание и концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере  
 Изменения фотосинтеза в онтогенезе  
 Совместное влияние факторов  
 Понятие о моделировании процесса фотосинтеза  
 Дыхание  
 Системное представление процессов дыхания и фотосинтеза.

### **Глава III.2. Растение и вода**

Понятие о влагообеспеченности растений. Транспирация.  
 Термодинамический подход к описанию передвижения влаги в системе «почва-растение-атмосфера»  
 Критическое давление влаги в почве. Научные основы регулирования водного питания растений  
 Зависимость критического давления от различных факторов  
 Взаимосвязь водного питания растений, фотосинтеза, роста и продуктивности растений.  
 Системный подход при анализе влагообеспеченности  
 Взаимосвязь почвенной влаги и урожая растений  
 Улучшение влагообеспеченности растений. Эффективность водопотребления растений  
 Факторы управления водообеспеченностью растений

### **Глава III.3. Физика минерального питания**

Основные элементы минерального питания растений  
 Основные механизмы переноса веществ  
 Математическая модель поглощения минеральных веществ  
 Транспорт веществ по растению

**Глава III.4. Растения и свет**

Значение светового потока для растений

Рост и усвоение солнечной радиации

Направление светового потока

Влияние интенсивности света на параметры роста

Фотопериодичность. Свет как фактор онтогенеза

**Глава III.5. Рост, развитие и формирование продуктивности**

Основные параметры роста и развития

Параметры роста

Влияние физических факторов на рост растений

Соотношение корневой и надземной биомассы

Влияние на рост корней внешних условий

Биологический блок в модели продуктивности

**Справочные материалы**

## ВВЕДЕНИЕ

Агрофизика – наука о физических основах формирования урожая. Это, скорее, понятие об агрофизике, чем определение этой науки. Существует более полное, можно сказать энциклопедическое, определение науки агрофизики.

**Агрономическая физика (Агрофизика) - наука, изучающая физические, физико-химические и биофизические процессы в системе “почва - растение – деятельный слой атмосферы”, основные закономерности продукционного процесса, разрабатывающая научные основы, методы, технические, математические средства и агроприемы рационального использования природных ресурсов, повышения эффективности и устойчивости агроэкосистем, земледелия и растениеводства в полевых и регулируемых условиях.**

Однако, хотя в этом определении указываются почти все разделы агрофизики, возможные отрасли ее приложения, объекты и методы, все же нередко возникают вопросы в специфике именно агрофизических объектов, методов и теорий. Действительно, ростом и развитием растений, биохимическими и молекулярными основами процессов в растении занимаются известная наука – физиология растений. Исследованиями физических свойств и режимов почв занимается также вполне конкретная наука – физика почв. Да и деятельный слой атмосферы давно, хорошо разработанными методами исследует метеорология. Чем же отличаются подходы и методы агрофизики от методов физиологии растений, физики почв, метеорологии?

Когда-то, в 70-х годах прошлого столетия известный ученый, один из основателей современной агрофизики академик Сергей Владимирович Нерпин, на вопрос, что же должна изучать агрофизика, ответил: «Все физические процессы, которые происходят на сельскохозяйственном поле». Это была скорее реплика, чем конкретное научное определение. Однако, даже в нем просвечивается основное качественное отличие агрофизики от смежных наук. Оно заключается прежде всего в подходе, в методе изучения процессов на сельскохозяйственном поле. Агрофизика интересуется физикой процессов (будь процессы в почве, растении, атмосфере), предлагает физическую модель явления. Эта модель завершается составлением некоторой схемы взаимосвязей между основными процессами. Это так называется функциональная блок-схема. На следующем этапе изучения явления агрофизики должны наполнить эту концептуальную схему конкретными зависимостями между отдельными функционирующими блоками (например, между фотосинтезом и дыханием), между отдельными процессами и действующими физическими факторами внешней среды (например, между фотосинтезом и температурой). В результате полевых и лабораторных экспериментов выделяются физические параметры, формируется вид зависимости между изучаемыми блоками. А далее, на заключительном этапе исследования, уже формулируется математическая модель исследованных явлений во взаимосвязи с факторами внешней среды, которая указывает на то, что, во-первых, данный раздел достаточно хорошо изучен, вплоть до функциональных зависимостей, описывающих основные физические процессы исследуемого раздела, а во-вторых, появляется возможность научно-обоснованно управлять этими явлениями с учетом всех тех взаимосвязей, которые изучили агрофизики-теоретики и экспериментаторы на предыдущих этапах. Вот такой физический подход к природным явлениям, включающий выделение основных процессов и воздействующих факторов внешней среды, экспериментальное изучение связей этих процессов друг с другом и факторами и количественное описание этих взаимосвязей в виде физически-обоснованных математических моделей и есть свой оригинальный путь

исследования, свой метод познания физических явлений, происходящих на сельскохозяйственном поле, в лесничествах, в теплицах, на спортивных площадках и пр. Этим методом, такой последовательностью ознакомления с биофизическими процессами в системе «почва - растение – деятельный слой атмосферы» мы и будем пользоваться при изучении курса «Агрофизики».

Какие общие закономерности, правила, закономерности пройдут «красной нитью» через весь этот курс? Их несколько:

*1. Вид биологических кривых.* Практически все зависимости интенсивности биологических процессов от воздействующих факторов имеют вид куполообразных функций, которые нередко называют биологическими кривыми. Обобщенный вид такой кривой приведен на рисунке.

Вид этой кривой весьма характерен: имеется диапазон действующего фактора при котором достигается максимум интенсивности рассматриваемого биологического процесса. А при увеличении или снижении параметра физического фактора этот биологический процесс идет на убыль. Это очень характерная зависимость. Причем ширина «купола» указывает на биологическую устойчивость растений и характеризуется в биологии понятием толерантности. А значения параметров физических факторов, отвечающих «куполу» этой функции – это биологический оптимум. Это оптимум может быть характерен как для отдельного биологического процесса, так и условий жизни экосистемы. С таким видом кривых зависимости биологических процессов (например, фотосинтеза, дыхания, роста, продуктивности и проч.) от внешних физических факторов (температуры, концентрации  $\text{CO}_2$ , влажности и проч.) мы не раз столкнемся в нашем курсе, еще не раз вернемся к функциям, описывающим такую куполообразную зависимость.

*2. Применение физических законов* (прежде всего закона баланса и переноса веществ и энергии) обязательно требует соблюдения правила сохранения размерностей. Поэтому все физические величины имеют свою размерность, которая сохраняется всегда. И при описании биологических процессов физическими методами также необходимо соблюдение этого правила, так как определенным итогом изучения процесса является математическое уравнение. А нем размерность левой и правой частей должна совпадать. Это обязательное условие для физического описания процессов. Это условие возникает еще и из-за необходимости соблюдать баланс веществ и энергии в рассматриваемой системе. Оно особенно важно в агрофизике, так как наша наука захватывает различные разделы физики, где фигурируют разнообразные размерности. Например, при изучении световых потоков, используются такие единицы системы СИ, как кандела, люмен, люкс, а также внесистемные - «фот», «стильб». Необходимо знать и уметь переводить единицы измерений из одной размерности в другую.

*3. В предмете агрофизика основной пространственный масштаб – это агроценоз.* Следует подчеркнуть, - именно агроценоз, не отдельное растение или его клетка (это область физиологии, биохимии и биофизики растений), не отдельный почвенный индивидуум (это область почвоведения и физики почв), а система «почвенный покров поля – агрофитоценоз – деятельный слой атмосферы поля». В агрофизике, как и в других науках о биосфере, следует различать несколько иерархических пространственных уровней:

*элементарный* – это уровень почвенного разреза, растения и воздушной среды около растения;

*уровень агроценоза* - почвенный покров со свойственным ему агрофитоценозом и приземным слоем атмосферы. Это, как уже указывалось, основной иерархический уровень исследования агрофизики;

*ландшафтный уровень* – включает уже несколько агроценозов, имеющих характерный водосбор, чередование агрофитоценозов и мезоклиматических условий.

На любом из указанных пространственных уровней добавляются некоторые специфические, свойственные данному масштабу, законы и закономерности. Мы же

должны четко представлять, что центральный масштабный уровень современной агрофизики – это уровень агроценоза, основные физические законы и закономерности которого мы и будем изучать. Впрочем, весьма часто привлекая материал и из более низких уровней для понимания фундаментальных процессов, происходящих в агроценозе.

4. И еще одна особенность агрофизического подхода к описанию биологических процессов. Дело в том, что биологические процессы, - процессы роста, развития, - это *стадийные процессы*. Одна стадия развития закономерно сменяется другой в процессе периода вегетации, или, как это принято в биологии, в процессе онтогенеза. Описать такую стадийность на основании рассмотрения биологических процессов не всегда удается из-за сложности, многофакторности, а иногда, и просто неизученности явления перехода одной стадии в другую. На вопросы «Почему? Когда?» одна стадия развития сменяет другую нередко просто нет ответов. В агрофизике поэтому разработан интересный подход: надо найти связь наступления стадии с некоторым кумулятивным (т.е. накапливающимся) фактором внешней среды. Например, с суммой положительных температур. Вот этот кумулятивный фактор уже достаточно устойчиво для данного вида растений связан с наступлениями той или иной стадии. В этом и заключается один из специальных агрофизических подходов, который нередко нами будет использован в данном курсе.

### Основные законы продукционного процесса

#### *Определение*

**Продукционный процесс растений** – это совокупность взаимосвязанных процессов, происходящих в растении, из которых основными являются фотосинтез, дыхание, рост, формирующих урожай растений.

Продукционный процесс зависит от факторов внешней среды и способен сам трансформировать средообразующие факторы через изменение газообмена, транспирацию, архитектуру посевов.

Из этих определений следует, что продукционный процесс – весьма разнообразен, включает, кроме трех основных (фотосинтез, дыхание, рост) еще и многие процессы в растениях, которые зависят от факторов внешней среды. Эти факторы внешней среды растения способны видоизменять сами, трансформировать их в некоторых пределах. Хорошо известно, как растения благодаря строению листьев и их расположению (архитектура посевов, движение листьев за Солнцем) способны достичь максимального потребления света. Другим примером может служить способность растений формировать сомкнутые покровы, в которых устанавливается определенный, отличный от условий над растительным покровом микроклимат: в посеве и около него другая влажность, температура, скорость ветра, и соответственно, иные транспирация, дыхание и многие другие взаимосвязанные процессы.

Несмотря на многообразие факторов, определяющих продукционный процесс, несмотря на многочисленные приспособительные реакции растений, их разнообразие, в агрофизике выделяют несколько общих законов продукционного процесса, которые также пройдут «красной нитью» через весь курс «Агрофизики». Этих законов немного, мы выделим пять основных. Некоторые из них совершенно очевидны и понятны на обыденном уровне. Другие требуют более подробного рассмотрения, которое будет сделано в данном курсе (в основном, в III-й Части). Сейчас же мы их просто перечислим и кратко прокомментируем:

*1. Закон незаменимости основных факторов жизни.* Этот закон утверждает, что ни один из факторов развития растений не может быть полностью заменен каким-либо другим. Ведь нельзя же заменить для растения тепло – влагой, влагу – светом и проч. Все эти факторы обязательно (свет, тепло, влага) необходимы растениям. В отсутствии хотя бы одного из них оно погибнет. Эти факторы, - свет, тепло, влага, - факторы космические,

их ничем нельзя заменить, они – основные, все определяющие факторы (см. «*К вопросу о...*»). Из этого закона следует очень важный вывод, на который иногда указывают, как на самостоятельный закон, столь важно его значение. Это закон «физиологических часов». Для растений одним из основных регулирующих фактором является фотопериодичность, регулярность светового режима в каждой природной зоне. Именно длина дня и ночи является для большинства растений регулятором для наступления определенных стадий развития. Например, «запуск» подготовки деревьев к зиме, заключающейся в том, что они сбрасывают листья, замедляют многие физиологические процессы, происходит именно при определенной длине дня. Для растений длина дня – неумолимый космический фактор, на который оно всегда, вне зависимости от складывающихся в этот год метеоусловий, может опираться.

2. *Закон неравноценности и компенсирующего воздействия факторов среды.* Действительно, основные факторы, такие как тепло, свет, воду, заменить ничем нельзя. А вот их действие как-то изменить могут другие факторы. Например, облачность, туман могут ослабить недостаток влаги. А ветер ослабляет неблагоприятное действие заморозков. Главное же отличие этого закона от 1-го (закона незаменимости основных факторов жизни): первый действует всегда, на протяжении всей жизни растения, а второй – в отдельные периоды жизни растения, снижая неблагоприятные или увеличивая благоприятное действие основных факторов жизни.

3. *Закон минимума.* Этот закон часто трактуется как закон Либиха в отношении питательных элементов для растений, и его нередко представляют в виде бочки с досками разной длины. Самая низкая дощечка определяет урожай. Мы будем трактовать этот закон более обще, агрофизически: интенсивность продукционного процесса определяется действием того физического фактора среды, который наиболее удален по значениям от своего оптимума. При такой трактовке из этого закона есть два следствия или самостоятельных закона:

(1) рост интенсивности процесса будет определяться скоростью прироста фактора, наиболее удаленного от оптимума. Часто этот закон приводят в формулировке известного немецкого агрофизика Э.Вольни: «Фактор, находящийся в минимуме, тем сильнее влияет на урожай, чем больше остальные факторы находятся в оптимуме» и именуется в литературе как закон Э. Вольни-Либшера;

(2) следует учитывать «компенсирующее» действие других, находящихся не в оптимальных условиях, факторов (см. закон 2 о компенсирующем воздействии факторов среды).

4. *Закон оптимума.* Этот закон гласит, что наивысшая скорость продукционного процесса достигается при достижении всеми факторами своего оптимума. Иначе говоря, максимальный урожай может быть достигнут только при оптимизации всех основных факторов жизни. Этот закон тоже может рассматриваться как следствие 1-го закона о незаменимости факторов внешней среды. Однако именно этот закон является руководящим для достижения максимальной продуктивности за счет оптимизации действия разнообразных факторов. Именно поэтому он так важен и выделен в отдельный закон.

5. *Закон «критических периодов».* Этот закон указывает на то, что в жизни растения имеются периоды, в течение которых растение наиболее чувствительно к недостатку того или иного фактора. Например, для многих зерновых культур критическим периодом в отношении к почвенной влаге считается период от выхода в трубку до колошения. Если в эту фазу развития растений сложится недостаток влаги в почве, то потери будут наибольшими, иногда – критическими. А фазы от цветения до восковой спелости являются критическими в отношении тепла.

Эти законы агрофизики, законы, связывающие физические факторы среды и продукционный процесс являются весьма общими, действующими в любых природных или искусственно созданных условиях. Хотя в каждом конкретном случае следует



учитывать региональные особенности как внешних для растения факторов (почвенные, метеорологические и погодные условия и проч.), так и особенностей самих растений.

---

*К вопросу о...»*

Солнце, воздух и вода!

Авторов этой книги, которым довелось попутешествовать по засушливым пустынным районам Азии и Африки, всегда поражал факт пробуждения природы в сезон дождей. Это действительно поразительный процесс. Представим: Западная Африка, Сахельская зона, полупустыня, близко Сахара. Почва – красная ферралитная, практически обожженный кирпич. Все холмы, склоны – все красного цвета, эдакий кирпичный панцирь, состоящий из красных обожженных зерен-«окатышей» и небольшого количества глины. Полагаю, что содержание гумуса в этой почве близко к нулю, доступных азота и фосфора – также. Все прожжено солнцем, просушено ветрами из пустыни, лишь отдельные кустики, безжизненные былинки. И вот в конце мая - начале июня начинается сезон дождей. Экваториальные ливни – это праздник! Теплый водопад с небес, короткий, шумный, буйственный! Проходит два-три первых ливня и через несколько дней после них вдруг видишь, что холмы позеленели. Появилась первая трава, листочки на засохших кустиках. Дальше – больше. Еще несколько дней – и трава уже по колено, все зелено, изумрудная зелень повсюду, растет с огромной скоростью (по 2-3 см в сутки), просто поразительно. Но, наблюдая, отмечаешь важный для агрофизиков факт: при практически полном традиционном для нас понимании плодородия почв (наличие гумуса, азота, фосфора, калия), и вдруг такое растительное буйство, такой рост! Значит не все определяется питательными веществами почвы, хотя и они имеют значение. Главное – это солнечная энергия (нужная для фотосинтеза), это прогретая, теплая почва, это достаточное количество внутрипочвенного воздуха (для дыхания корней и их функционирования, роста), это, наконец, вода. Главными, все определяющими, оказываются незаменимые физические факторы, недостаток которых можно немного компенсировать внесением в почву удобрений, интенсивной технологией. Но если много солнца, достаточно в почве воздуха и, главное!- воды, то рост продукции обеспечен. Поэтому в таких странах, как Израиль, Италия и других солнечных южных, основная забота – стабильное обеспечение водой, а в гидроморфных почвах (по долинам рек) – и воздухом. Тогда при прогрессивной агротехнологии урожаи, высокие и по несколько в год, обеспечены. А определяют их прежде всего благоприятные агрофизические условия! Вот что значит – солнечная радиация, тепло, воздух и вода!

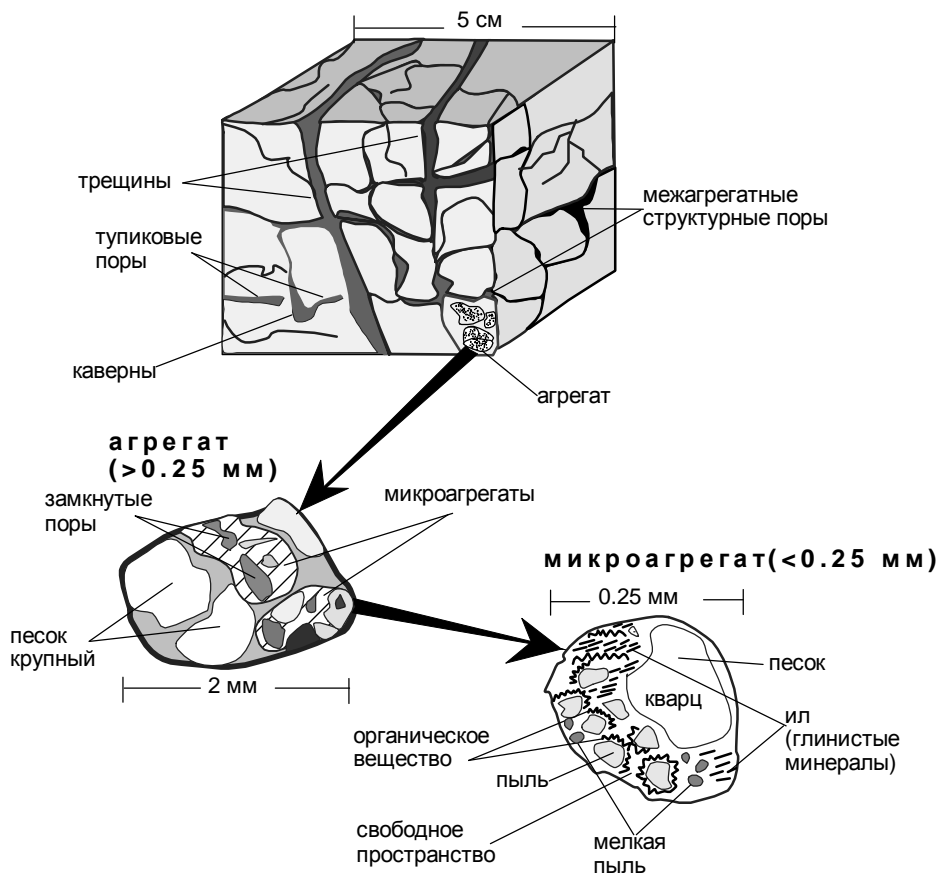
---

## Часть I. Физика почв

### Глава I.1. Твердая фаза почв

#### Плотность твердой фазы почвы, агрегатов, почвы

Почва, ее физические свойства – это одно из центральных понятий производственного процесса. Действительно, она обеспечивает растения питательными веществами и водой, она преобразует солнечную радиацию в тепло, хранит это тепло, являясь теплым «одеялом» для семян растений, она впитывает осадки, сохраняет воду, избавляясь от ее избытков и предоставляя воздуху свободно циркулировать в поровом пространстве. С точки зрения агрофизики почва – это гетерогенная многофазная дисперсная система с определенными верхней (как правило, дневная поверхность) и нижней (граница с подстилающей породой или уровень грунтовых вод) границами. Она обладает свойствами аккумулировать и выделять, проводить и трансформировать вещества и энергию. Остановимся подробнее на свойствах гетерогенности, многофазности и дисперсности почвы. Гетерогенная – эта характеристика указывает на то, что различные почвенные частицы почвы могут иметь разное происхождение. Могут, например, представлять собой остатки растительного происхождения, образовываться при дроблении минеральных частиц, являться вторичными (глинистыми) минералами. Даже частицы очень близкие по форме и размерам могут иметь разную природу и обладать различными свойствами, как, в частности, частицы минеральные и органические. Рассмотрим почву при разном увеличении (рис. I.1.1): кубик почвы 5х5х5 см состоит из отдельных агрегатов, пронизан трещинами, межагрегатными порами. Этот кубик распадается на отдельные агрегаты, – почвенные отдельности размерами  $>0.25$  мм, которые в свою очередь состоят из микроагрегатов. А вот в микроагрегатах представлены отдельные почвенные частицы. Это частицы первичных минералов, кварца, органические остатки, очень тонкие глинистые минералы, которые представляют собой первозлементы почвы, – элементарные почвенные частицы.



**Рис. I.1.1.** Иерархическая организация почвы: образец из почвенного горизонта, почвенный агрегат и микроагрегат, состоящий из элементарных почвенных частиц.

Элементарные почвенные частицы совместно представляют собой твердую фазу почвы. Для характеристики твердой фазы мы можем применить традиционные физические параметры, такие как плотность. Эта физическая величина определяется массой вещества в единице объема. В данном случае, для *плотности твердой фазы почвы* ( $\rho_s$ ), это будет масса всех почвенных частиц ( $m_s$ ), отнесенная к их объему ( $V_s$ ):

$$r_s = \frac{m_s}{V_s} - \text{плотность твердой фазы почвы, г/см}^3.$$

Твердая фаза почвы, как это видно из рис. I.1.1., представлена частицами различного происхождения и различной своей природной плотности. Например, органическое вещество имеет плотность 1.3-1.5 г/см<sup>3</sup>, а минералы, составляющих твердую фазу почв - 2,6 - 2,8 г/см<sup>3</sup>. Плотность же твердой фазы почвы является средневзвешенной величиной всех составляющих ее компонентов, - и органических веществ, и различных минералов. Поэтому плотность почвы,  $\rho_s$ , существенно зависит от состава почвенной твердой фазы: для торфяных почв она близка к 1.4 г/см<sup>3</sup>, для пахотных горизонтов колеблется в пределах 2.4-2.7, а в горизонтах В и С достигать 2.65-2.75 г/см<sup>3</sup> (см. табл. I.1.1).

Вернемся к рис. I.1.1. Из него видно, что элементарные почвенные частицы объединены в микроагрегаты и агрегаты. Можно определить плотность и этих почвенных образований, *плотность агрегата*,  $\rho_a$ : это будет масса ( $m_s$ ) единицы объема почвенного агрегата,  $V_a$ :  $r_a = \frac{m_s}{V_a}$ . Заметим, что масса в данном выражении – та же, что и для

плотности твердой фазы: ведь массу агрегата составляют те же самые твердофазные элементарные почвенные частицы. Так как элементарные почвенные частицы, соединяясь в агрегат, образуют поры, то и плотность агрегата будет заметно ниже плотности почвы, составляя 1.3-1.8 г/см<sup>3</sup>. Зная плотность твердой фазы и плотность агрегата, можно рассчитать и порозность агрегата – объем пор агрегата, отнесенный к объему агрегата:

$$e_{agr} = \frac{V_{пор}}{V_a},$$

где  $e_{agr}$  – порозность агрегатов, выраженная в долях от объема (см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>), или, в случае умножения на 100, - в процентах. Можно более подробно раскрыть значение этой формулы, учитывая, что  $V_{пор} = V_a - V_s$ , а  $V_a = \frac{m_s}{r_a}$  и  $V_s = \frac{m_s}{r_s}$ :

$$e_{agr} = \frac{V_a - V_s}{V_a} = \frac{\frac{m_s}{r_a} - \frac{m_s}{r_s}}{\frac{m_s}{r_a}} = 1 - \frac{r_a}{r_s}.$$

Так по величинам плотности твердой фазы и плотности агрегатов можно рассчитать порозность агрегатов.

Аналогично можно поступить и для почвенного образца. Для него тоже можно ввести понятие плотности: это будет плотность почвы. Но в этом случае следует учесть, что в объем образца вошли свойственные естественной почве трещины, каверны и прочие пустоты (см. рис. I.1.1). Поэтому *плотность почвы*,  $\rho_b$ , – масса единицы объема почвы в ее естественном, ненарушенном состоянии:

$$r_b = \frac{m_s}{V_t} - \text{плотность почвы, г/см}^3.$$

Плотность почвы – одно из основных, фундаментальных свойств почвы. Без знания этой величины невозможны никакие расчеты, никакая количественная оценка почв. Поэтому данные по плотности и порозности почвенных слоев и горизонтов обязательно

сопровождают полную характеристику почвенного профиля. Как и для составляющего почву агрегата для почвы в целом также можно ввести понятие порозности, как отношение объема пор к объему всего образца, и определить порозность через плотность почвы и твердой фазы почвы:

$$e_{\text{агр}} = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{почвы}}} = \frac{V_{\text{почвы}} - V_s}{V_{\text{почвы}}} = 1 - \frac{r_b}{r_s}$$

В таблице I.1.1. приведены характерные значения плотностей для разнообразных почвенных объектов

Т а б л и ц а I.1.1

Типичные значения плотности различных почв

Почвенные объекты	плотность твердой фазы почвы, $r_s$ , г/см <sup>3</sup>	плотность почвы, $r_b$ , г/см <sup>3</sup>	плотность агрегатов, $r_a$ , г/см <sup>3</sup>	Порозность почвы, $e$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>
Пахотные горизонты минеральных почв:				
суглинистые	2.55–2.65	0.8–1.5	1.3–1.8	0.69–0.46
песчаные	2.50–2.70	1.4–1.7	–	0.46–0.35
Горизонты В и С	2.65–2.75	1.5–1.8	1.4–1.9	0.43–0.32
Торф (верховой)	1.35–1.45	0.1–0.3	–	0.93–0.79

Приведенные величины – это возможный интервал встречающихся значений. Однако для нормального функционирования почв существуют некоторый оптимальный диапазон, находящийся внутри указанных крайних значений. Мы переходим к оценке этих составляющих порового пространства, к рассмотрению плотности почвы, составляющих ее различных видов пористостей как важнейших агрофизических характеристик почвы, от которых зависит урожай растений и другие биосферные функции почв.

#### Определения

**Плотность твердой фазы почв ( $r_s$ )** – масса твердых компонентов почвы в единице объема без учета пор.

**Плотность почвы ( $r_b$ )** – масса абсолютно сухой почвы в единице объема почвы со всеми свойственными естественной почве пустотами.

**Порозность (синоним – пористость) почвы ( $e$ )** – объем почвенных пор в почвенном образце по отношению к объему всего образца [см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, %]. Рассчитывается по данным о плотности почвы ( $r_b$ ) и твердой фазы почвы ( $r_s$ ):  $e = \frac{r_s - r_b}{r_s}$  [см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>].

#### Агрофизическое значение плотности почвы

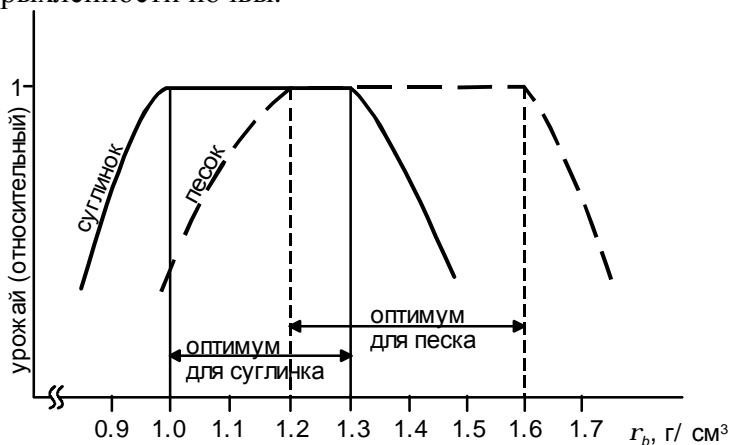
Плотность почвы во многом определяет урожай растений. Она оказывает влияние на рост корневой системы растений, так как уплотненная почва является существенной преградой для проникновения корней. В уплотненной почве, при высокой величине  $r_b$  низка порозность почвы. Значит, в почве содержится мало воды. При выпадении же осадков поры быстро заполняются водой, и почва содержит мало воздуха, также необходимого для роста корней и развития растений. В случае же излишне рыхлой почвы поровое пространство столь велико, что корни растений не имеют хорошего контакта с поверхностью твердой фазы, где содержатся в поглощенном состоянии многие элементы питания. Это приводит к снижению урожая в разрыхленной почве. Необходимо применять приемы прикатывания почвы для создания оптимального диапазона ее плотности. Поэтому проблема создания пахотного слоя, оптимального по физическому состоянию, по плотности – одна из важнейших проблем современной физики почв и агротехники. Она состоит в том, чтобы разрыхлить почву и не допустить уплотнения

почвы тяжелой сельскохозяйственной техникой. А это требует своевременного проведения агротехнических работ, обязательно связанными с распашкой почвы (см. «К вопросу о...»). Почва особенно подвержена уплотнению при повышенной влажности. Стоит тяжелой технике лишь один раз заехать на поле, когда влажность несколько выше оптимальной для обработки, как поверхностный слой почвы становится излишне уплотненным.

Еще один аспект уплотнения – переуплотнение подпахотного слоя, так называемое накопительное или подпочвенное уплотнение. Действительно, под влиянием многократных проходов техники уплотнение сказывается все глубже и глубже. Происходит образование подпахотного уплотненного, плохопроницаемого и для воды, и для воздуха слоя. Сложность в том, что контролировать внутрипочвенное уплотнение очень трудно, – оно незаметно с поверхности почвы так, как видна, например, эрозия, или поверхностное уплотнение. Анализ и прогноз этого явления тесно связан с оценкой физико-механических свойств почв.

Таким образом, уплотнение как поверхностное, так и подпочвенное – весьма пагубные явления, неизменно сопровождающие интенсивное сельскохозяйственное производство. Вернуть же почву в прежнее состояние весьма затруднительно. С этим связан второй аспект проблемы – разуплотнение почвы. Как правило, разрыхлить поверхностный пахотный слой почвы не сложно. Достаточно его вспахать, взрыхлить различными почвообрабатывающими орудиями. Но вот разрыхлить агрегаты – основное хранилище питательных веществ, воды, почвенной биоты – значительно сложнее. Агротехнические меры здесь не помогут. Восстановление внутриагрегатной порозности обязано деятельности почвенных микроорганизмов, накоплению специфических органических веществ. Необходимо применение органических и зеленых удобрений, влияющих на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов, улучшающих состояние почвы.

Итак, не только повышенная, но и излишне низкая плотность почвы снижает урожай. На рис. I.1.2 схематически показаны области влияния переуплотнения и излишней разрыхленности почвы.



**Рис. I.1.2.** Зависимость урожая (в относительных единицах) от плотности суглинистой и песчаной почв

Оптимум же по данным большинства исследователей (А.Г.Бондарев, 1985) для суглинистых почв находится в области от 1.0 до 1.3 г/см<sup>3</sup> (см. также Табл.2 Приложения). Если говорить о порозности почвы, которая является прямой функцией от плотности почвы, то и для этой величины предложен ряд критериев и диапазонов оптимальности. Н.А.Качинский (1985) предложил выделять следующие диапазоны по порозности почвы (порозность почв в см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>):

- отличная (культурный пахотный слой) – 0.65–0.55;
- удовлетворительная для пахотного слоя – 0.55–0.50;
- неудовлетворительная для пахотного слоя – <0.50;

чрезмерно низкая – 0.40–0.25.

*К вопросу о....*

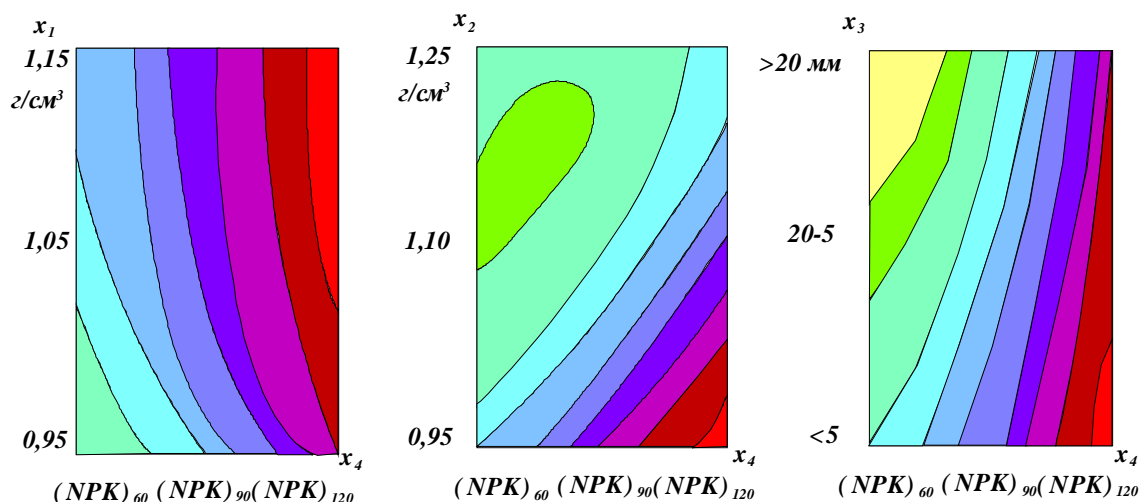
#### О плуге

Все началось с того, что несколько тысяч лет назад человек бросил в почву несколько семян, показавшихся ему вкусными. А может быть он это сделал с какими-то ритуальными, религиозными целями. Произошло это где-то на Ближнем Востоке, возможно в долине Иордана, возможно в верховьях Тигра и Евфрата. А уж затем пшеницы однозернянка и двузернянка, ячмень, чечевица, вика, горох распространились по всему Леванту, а затем уже по Нилу, на север Африки. Но эти семена надо было поместить в почву, предохранив от выдувания, высыхания. На влажных глинистых почвах древние люди делали это сначала подобиями мотыг, заступов, кетменей. А вот когда пришла пора оседлого земледелия, можно сказать, наступила эпоха профессиональных земледельцев, появились орудия, способные сделать бороздку для семян. Возможно, первые плуги, делающие бороздки для семян, появились практически одновременно и в передней Азии, и в Египте, и в Китае. Они представляли собой деревянное орудие, состоящее из вертикального кола (грядиля), на нижнем конце которого был надет металлический лемешок. Тянули это орудие за веревку, привязанную к нижнему концу, а за верхний управлял пахарь. А затем уже появились первые плуги, отражающие особенности местных почвенно-климатических условий. «Рассыпчатые» почвы долины Нила можно было обрабатывать вертикально расположенным лемехом, а вот твердую, нередко каменистую почву Греции необходимо было «поддеть» снизу. Поэтому в Греции лемех устанавливали горизонтально. И в России соха ставилась перпендикулярно к поверхности земли, при вспашке тонко чувствуя всякие неровности, камни, толстые корни, которые всегда были в северных российских землях. Соха, за счет ее вертикальной подвижности и тонкого пахотного следа, нередко называлась в народе «черкушей» - она чиркала по поверхности камней и толстых корней, делая неглубокую борозду. Но вот уже в последующие годы плуг изменил свое предназначение, - им не только делают ложе для семян, но и рыхлят почву, избавляются от вредных сорняков, отбрасывая почву в стороны. И в черноземных почвах появились первые плуги с предплужниками (украинский «сабан»), подрезающими снизу переплетенный корнями верхний слой черноземов, т.н. «степной войлок», и укладывающий его вниз борозды. Этот корневищный слой засыпается землей и превращается впоследствии снова в прекрасную черноземную структуру, сохраняющую воду, проводящую воздух. Так и получилось, что из-за особенностей неустойчивого российского климата российские земледельцы, а вместе с ними и ученые, сосредоточили свои усилия на создание оптимальных физических свойств почв, на сохранении влаги, агрегации почвы, на исследовании почв именно в направлении мелиорации их физических свойств. А вот европейское направление в почвоведении большее внимание уделяло развитию новых методов удобрения земли, прежде всего, вслед за Либихом, агрохимических. Однако, уже сейчас ясно, что одно без другого невозможно, что нужна «система земледелия», которая становится точной наукой, с расчетными управляющими моделями, способными указать время, место, необходимость как улучшения физических свойств, питательного режима, наилучшего способа борьбы с сорняками, так и предвидеть последствия этих мер на окружающую среду, на здоровье человека и биосферы в целом. А ведь начиналось земледелие с «черкуши».... (с использованием материалов книги Ю.Ф.Новикова «Осторожно: terra!» Изд-во «Молодая гвардия», 1972)

Возникает, впрочем, и еще один вопрос: а требуется ли разделение пахотного слоя на слои с различным структурным составом, или он должен быть равномерным по всей своей глубине (обычно 22-25 см)?

В специальных опытах известный украинский агрофизик В.В.Медведев попытался ответить на эти вопросы. Из опыта земледельцев средней полосы (в основном, Нечерноземья) известно, что лучшим строением пахотного слоя при заделке семян является такое состояние, когда семя лежит на уплотненной подложке, а поверхностный слой представлен разрыхленным мелкокомковатым материалом. В этом случае семена не выпучивались на поверхность почвы при увлажнении, осуществлялся их хороший контакт с почвой, а верхний слой способствовал аэрации и сохранял влагу за счет быстрого образования мульчирующего слоя. Эти закономерности были открыты для зоны южной тайги, для дерново-подзолистых, серых лесных почв. Справедливы ли они и для условий засушливых степей?

Опыт включал 3 фактора: (1) структуру в виде трех градаций по размерам агрегатов, (2) удобрения в виде различных доз NPK - 60, 90 и 120 кг/га) и (3) плотность в слое, покрывающем семена.

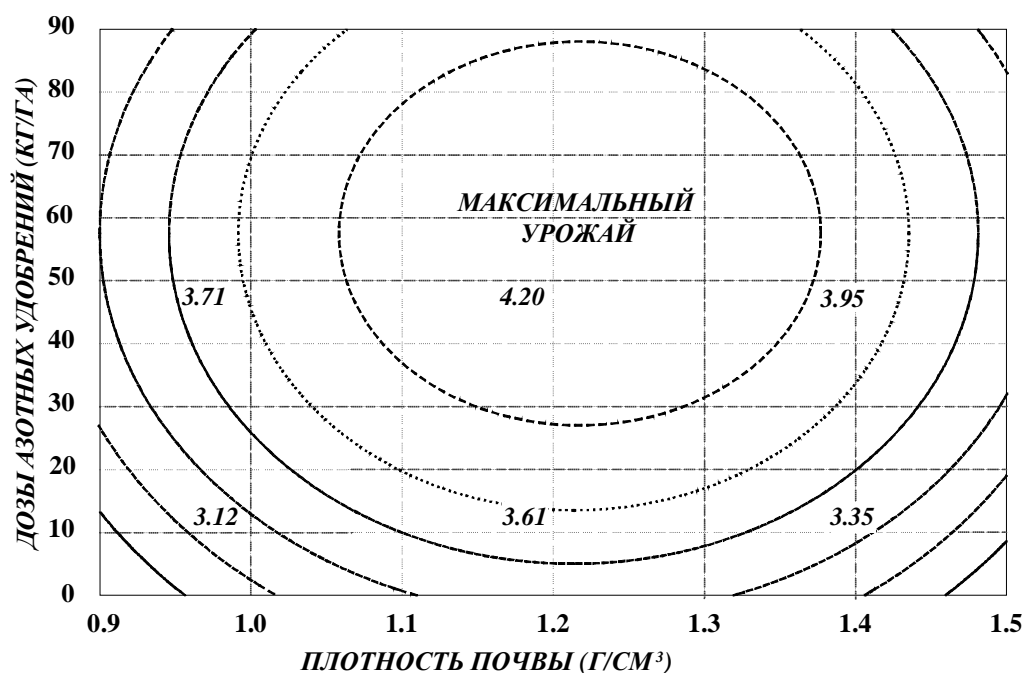


**Рис.1.1.3.** Изолинии массы сухого снопа ячменя на площадь поверхности сосуда ( $\text{г/м}^2$ ) в зависимости от плотности почвы в надсеменном ( $x_1$ ) и подсеменном ( $x_2$ ) слоях, структурного состава семенного слоя ( $x_3$ ) и дозы удобрений ( $x_4$ ) в микрополевым опыте (по Медведеву, 1988). Красный цвет соответствует урожаю  $1326 \text{ г/м}^2$ , а интервал между изоквантами -  $66 \text{ г/м}^2$ .

На рис.1.1.3 представлены изолинии урожая на фоне различных доз удобрений. Действительно, для черноземов, в условиях частого недостатка влаги наилучшие условия для произрастания растений, потребления ими питательных веществ и их развития складываются тогда, когда поверхностный, надсеменной слой более уплотнен в пределах рассматриваемого диапазона ( $0.95\text{--}1.15 \text{ г/см}^3$ ), а подпахотный слой в большей степени разрыхлен. При одном и том же уровне удобрений больший урожай получался при более разрыхленном подсеменном слое. А наилучший размер агрегатов в самом семенном слое - менее 5 мм. Последнее еще раз подтверждает известный из практики земледелия принцип, гласящий, что размер агрегатов должен был близок к размеру семян. По всей видимости, в случае черноземных почв, где лимитирующим фактором выступает недостаток влаги в период посева, наибольшие запасы создаются тогда, когда подпахотный слой рыхлый и влагоемкий. А поверхностный слой, уплотненный, способен достаточно быстро проводить капиллярный поток влаги к семенам, и почвенные частицы хорошо контактируют с семенами. Получается, что взаимосвязь подтоков влаги к семенам и в последующем к корням растений, доступность питательных веществ, условия укладки семян в многом зависят не только от размеров семян, количества элементов питания, размера почвенных агрегатов, но и от условий укладки (на плотном или рыхлом слое) и климатических условий. Оптимизация агрофизических условий оказывается делом достаточно тонким, требующим всесторонних знаний.

Оптимальный диапазон плотности почв связан с использованием минеральных веществ растениями. В пахотном слое должны быть обеспечены условия наибольшей доступности питательных веществ для корней растений. Это проблема взаимосвязи физических и агрохимических свойств почв. В ряде опытов было показано, что диапазон плотности пахотного слоя суглинистых почв от  $1.1$  до  $1.35 \text{ г/см}^3$  в наилучшей степени способствует потреблению удобрений и формированию урожая. Этот факт представлен на рис.1.1.4, где при увеличении дозы вносимых азотных удобрений и при росте плотности почвы формируется зона наиболее высокого урожая: эта зона характеризуется дозами от  $30$  до  $85 \text{ кг/га}$  азотных удобрений и диапазоном плотности пахотного слоя от  $1.06$  до  $1.35 \text{ г/см}^3$ . Приведенные факты подчеркивают весьма важный факт: сочетание доз удобрений и создание плотности пахотного слоя должно производиться совместно. Важно именно

сочетание факторов, создание и поддержание оптимальных диапазонов физических условий и количества минеральных питательных веществ в пахотном слое.



**Рис. I.1.4.** Влияние плотности чернозема и дозы азотных удобрений на формирование урожая зерна ячменя (т/га) (по В.В.Медведеву, 2004). Цифры у кривых обозначают урожай.

Важно помнить о том, что оптимальные диапазоны плотности пахотного слоя различаются для песчаных и суглинистых почв (рис.I.1.2). Рекомендуется использовать следующие пределы оптимальных диапазонов плотности для различных почв (табл.I.1.2):

Т а б л и ц а I.2

Оптимальные диапазоны плотности (по А.Г.Бондареву, 1985)

Гранулометрический состав (текстура) почвы	Оптимальный диапазон плотности (г/см³)
Глинистые и суглинистые	1.0–1.3
Легкосуглинистые	1.10–1.40
Супесчаные	1.20–1.45
Песчаные	1.25–1.60

В этой таблице уже присутствуют градации почвы по гранулометрическому составу. Необходимо более подробно охарактеризовать этот важнейший показатель почвы.

### Гранулометрический состав

Снова вернемся к рис. I.1.1. На нем изображены элементарные почвенные частицы, составляющие микроагрегат, входящий в состав агрегата и почвы в целом. Т.е. вся почва состоит из элементарных почвенных частиц (ЭПЧ). ЭПЧ – это наименьшие частицы твердой фазы почвы ее первооснова, которые трудно разрушить физическими (растиранием) и химическими (воздействие щелочей и кислот) методами, за что они и называются *элементарными*.



В почве представлены частицы совсем тонкие – илистые, а также крупные – гравий (1–3 мм). Между этими частицами расположена область пылеватых и песчаных частиц. Илистые, как правило, имеют размеры  $<0.001$  мм. Эта целая область очень мелких, тонких частиц, куда входят и коллоиды ( $<0.0001$  мм). Частицы, крупнее 3 мм называют каменистой частью. Выделенные по размерам диапазоны (ил, пыль, песок, гравий, каменистая часть) называют *фракциями гранулометрических элементов*, а относительное содержание выделенных фракций – *гранулометрическим составом почв*.

Все элементарные почвенные частицы между илом и коллоидами разделяются на фракции. В зарубежной практике, как правило, используют разделение ЭПЧ на фракции по А.Аттербергу, который предложил выделять следующие фракции:  $<0.002$  мм – глина, 0.002–0.05 – пыль, 0.05–0.2 – тонкий песок, 0.2–2 – грубый песок,  $>2$  мм – гравий. Эти фракции и составляют основу большинства современных зарубежных классификаций.

В российской классификации выделяют следующие фракции ЭПЧ:  $<0.001$  – ил, 0.001–0.005 – пыль мелкая, 0.005–0.01 – пыль средняя, 0.01–0.05 – пыль крупная, 0.05–0.25 – песок мелкий, 0.25–0.5 – песок средний, 0.5–1.0 – песок крупный,  $>1$  мм – гравий.. Частицы  $<0.01$  мм объединены в более крупную группу – физической глины, а частицы  $>0.01$  мм – во фракцию физического песка. Некоторые фракции имеют и свое название. Так, фракция крупной пыли носит название «лессовидной фракции», так как именно она преобладает в лессах. Впрочем, справедливо и обратное: если в суглинке заметно преобладает именно эта, лессовидная фракция, то суглинок называют лессовидным. Границей такого преобладания служит величина 40%: если в суглинке содержание крупной пыли  $>40\%$ , то это лессовидный суглинок. Российскую классификацию частиц по фракциям разработал Н.А.Качинский, она носит его имя (см. «К вопросу о...»)

*К вопросу о...*

Никодим Антонович Качинский (12.11.1894-17.04.1976)

В 1894 году в губернском городе Ставрополе в семье ссыльного польского дворянина, повстанца 1863 г. и его жены, крестьянки из Костромской губернии, родился сын. Вся семья крестьянствовала на арендованных землях.

Никодим Антонович последовательно окончил Ставропольское двухклассное училище, Ставропольскую учительскую семинарию, Ставропольский учительский институт, Петровскую (Тимирязевскую) Академию по секции полеводства. До 1921 года учился и жил на заработки преподавателя. С 1921 года – началась его профессиональная деятельность как почвовед. А в Московском университете с 1923 г он последовательно прошел стадии научного сотрудника 2-го разряда, аспиранта, научного сотрудника 1-го разряда, действительного члена, профессора и заведующего кафедрой физики и мелиорации почв. Но сколько же Никодим Антонович работал по совместительству: зав.кафедрой почвоведения Оренбургского сельскохозяйственного института, профессор Московского гидрометеорологического института, заведующий лабораторией физики и технологии почв Почвенного института.

Вся история российской физики почв связана с именем Никодима Антоновича. Именно он обосновал систему методов в физике почв, которая вполне удовлетворяла задачам того времени, когда исследования велись на ключевых разрезах. Эти методы и почвенные изыскания на их основе позволили разработать многочисленные мелиоративные проекты. Одно перечисление руководимых им почвенно-мелиоративных экспедиций просто поражает: Средне-Волжская (1932-1933), Бакинская (1934-1935), Сталинградская – по испытанию машин (1936-1938), Кутулукская (1939-1941 и 1944-1946), по строительству аэродромов и водоемов (1941-1943), Уральская (1943-1945), Кубанская и Омская – по испытанию машин (1946), Донская (1947-1949), Сталинградская (1949-1957), Волго-Ахтубинская (1951-1954), Ленкоранская (1950-1953), Дальневосточная (1953-1956), Камская (1955-1957) – по исследованию физических свойств почв, и др. Названия и тематики этих экспедиций говорят о неугасающей, целенаправленной энергии Никодима Антоновича, его разносторонним талантам и преданности количественным методам физики почв. Какого раздела физики почв мы бы сейчас не коснулись, мы практически всегда встретим имя Качинского, как основателя либо метода, либо теории, либо термина. Данная книга тому доказательство.

Итак, выделены определенные фракции ЭПЧ по размерам, и каждая фракция получила свое название. Определение фракций необходимо нам для классификации и оценки гранулометрического состава почв, так как гранулометрический состав почв – это

относительное (в массовых процентах) содержание фракций элементарных почвенных частиц.

На данный момент в мире приняты два основных принципа построения классификаций почв по гранулометрии: (1) основанный на относительном содержании физической глины (частицы  $<0.01$  мм) с учетом содержания доминирующих фракций (классификация Н.А.Качинского) и (2) основанный на учете относительного содержания выделенных Аттербергом фракций физического песка, пыли и глины (Международная классификация и близкие к ней классификации общества почвоведов, агрономов США и др.). Иначе говоря, классификация Качинского – двучленная, так как основана на использовании, прежде всего, содержания физического песка и физической глины, а международная – трехчленная, причем в разных странах границы между глиной, песком, пылью несколько различаются.

Отечественная (классификация Н.А.Качинского), как указывалось, основана на соотношении содержания физического песка и глины. Вполне понятно, что сумма физического песка и физической глины составляет 100% и классификацию можно представить на основе лишь одного показателя, например, физической глины. Эта классификация представлена в табл. I.1.2.

Т а б л и ц а I.1.2

Классификация почв по гранулометрическому составу  
(по Н.А.Качинскому)

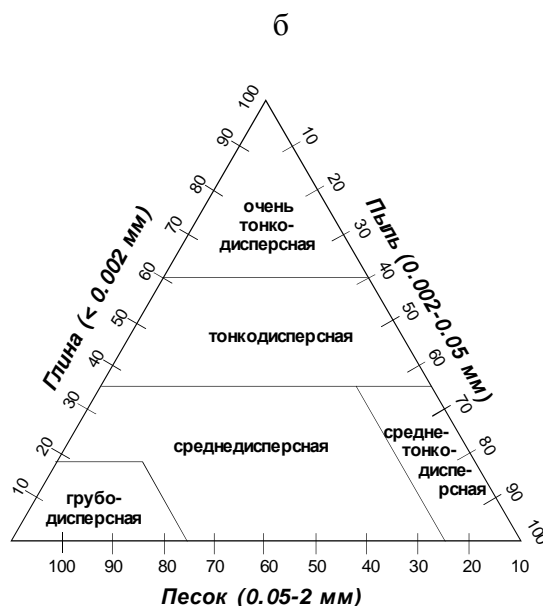
Содержание физической глины (частиц $< 0,01$ мм), %			Краткое название почвы по гранулометрическому составу
Подзолистого типа почвообразования	Степного типа почвообразования	Солонцы и сильно солонцеватые почвы	
0–5	0–5	0–5	Песок рыхлый (Пр)
5–10	5–10	5–10	Песок связанный (Псв)
10–20	10–20	10–15	Супесь (С)
20–30	20–30	15–20	Суглинок легкий (Сл)
30–40	30–45	20–30	Суглинок средний (Сср)
40–50	45–60	30–40	Суглинок тяжелый (Ст)
50–65	60–75	40–50	Глина легкая (Гл)
65–80	75–85	50–65	Глина средняя (Гср)
>80	>85	>65	Глина тяжелая (Гт)

Обратим внимание на два весьма характерных момента в отечественной классификации.

Рассмотрим первую графу в таблице. Диапазоны в содержании физической глины для различных категорий почв неравномерны. Например, для перехода от «песка рыхлого» к «песку связному» необходимо увеличение содержания физической глины всего на 5%. А вот от супеси к суглинкам и между суглинками – уже на 10%. Диапазоны глин имеют еще более широкий интервал – до 15%. По-видимому, это связано с тем, что в песках даже небольшое количество глины ведет к заметному изменению свойств почвы в целом. Напротив, для глинистых почв необходимо значительное количество физической глины, чтобы отличить глину легкую от глины средней.

Второй момент касается введения в классификацию типа почвообразования. Очень важным является то, что Н.А.Качинский выделил градации не просто по содержанию физической глины, но и с учетом типа почвообразования. Действительно, например, глина тяжелая в подзолистых почвах будет выделяться при содержании физической глины более 80%, а в солонцах – уже при 65%. Связано это с тем, что в солонце частицы глины совсем по-иному ведут себя, чем, скажем, в подзолистой почве. Глинистые частицы в солонце,





**Рис. I.1.5.** Треугольник Ферре для классификации почв по гранулометрическому составу (а) и упрощенная классификация (б), используемые в некоторых зарубежных классификациях

Как уже указывалось, отечественная классификация – двухмерная, использует соотношение физической глины и физического песка. Зарубежные – трехмерные. Кроме того, и границы фракций в этих классификациях не совпадают (сравните, в нашей – физическая глина  $<0.01$ , а в зарубежных  $<0.002$  мм, – очень значительные различия!). Поэтому прямого перехода из одной классификации в другую не существует (один из способов можно найти, например, в «Полевых и лабораторных методах...», 2001; см. Литературу к Главе I.1).

#### *Определения*

**Элементарные почвенные частицы (ЭПЧ)** – обломки горных пород и минералов, а также аморфные соединения, все элементы которых находятся в химической взаимосвязи и не поддаются разрушению общепринятыми методами пептизации.

**Фракция элементарных почвенных частиц, или фракция гранулометрическая** – элементарные почвенные частицы, объединенные по своим размерам в определенную группу. Выделяют фракции: 1-0.25мм (крупный песок), 0,25 - 0,05 мм (мелкий песок), 0,05- 0,01 мм (лессовидная крупная пыль), 0,01 - 0.005 мм (средняя пыль), 0,005 - 0,001 мм (мелкая пыль) и меньше 0,001 мм (ил). По содержанию фракций определяют гранулометрический состав почв.

Под **гранулометрическим** (механическим – устаревшее, почвенной текстурой) составом почв и почвообразующих пород понимают относительное содержание в почве фракций элементарных почвенных частиц различного диаметра, независимо от их минералогического и химического состава. Гранулометрический состав выражается в виде массовых процентов фракций гранулометрических частиц различного размера.

Гранулометрический состав почв – фундаментальное, базовое свойство почвы, во многом определяющее другие ее свойства и характеристики.

#### **Методы определения гранулометрического состава почв**

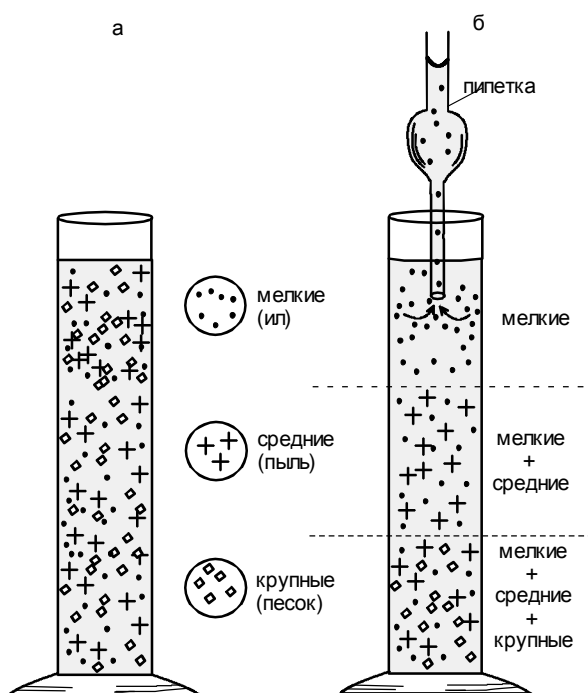
Гранулометрический анализ почв состоит из двух этапов: (1) диспергация почвенной массы и (2) анализ содержания частиц различного размера. Основной задачей первого этапа гранулометрического анализа является отделение элементарных почвенных

частиц друг от друга. Вспомним (рис. I.1.1), что почвенные частицы в почве соединены в микро- и макроагрегаты. Поэтому, прежде всего, важно разделить их. Для этого необходимо химическими и физическими методами разрушить тот природный «клей», который соединяет эти частицы. Такими природными «клеями», агрегирующими элементарные почвенные частицы, в почве, как правило, являются ионы  $\text{Ca}^{2+}$ , органические вещества, окислы Fe, Al. На первом этапе необходимо «нейтрализовать» их агрегирующее действие. Наилучшим методом в этом случае является применение пирофосфата натрия и последующее механическое воздействие (интенсивное растирание почвенной пасты, применение ультразвука). Механизм действия пирофосфата Na в этом случае таков: ион Na замещает в почвенном поглощающем комплексе ион Ca, снимая агрегирующее воздействие последнего и оказывая диспергирующее влияние на почву. Анион же пирофосфата предохраняет образовавшиеся частицы от коагуляции за счет формирования пленки фосфатов. Однако, даже если частицы и оказываются химически разделенными, для того чтобы между ними образовывались заметные водные прослойки, и они могли проявлять самостоятельно свои свойства, необходимо механическое воздействие. Это воздействие оказывают либо в виде механического растирания пасты в ступке пестиком с резиновым наконечником, либо в виде ультразвукового воздействия, либо в виде кипячения суспензии.

После этапа разделения частиц осуществляется второй этап гранулометрического анализа: определение содержания частиц того или иного размера с помощью, например, пипет-метода, основанного на применении закона Стокса и использующего основные принципы седиментометрии (А.Ф.Вадюнина, З.А.Корчагина, 1986). Эти принципы таковы. Используется закон Стокса для равномерного движения шарообразных частиц в жидкости:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g (\rho_s - \rho_w)}{\eta},$$

где  $v$  – скорость падения твердофазных частиц в жидкости,  $r$  – радиус частиц,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho_s$  и  $\rho_w$  – плотности твердой фазы почвы и воды,  $\eta$  – динамическая вязкость. Учитывая, что  $v = l/t$ , т.е. расстояние ( $l$ ) на время ( $t$ ), то можно точно рассчитать глубину, на которой окажутся частицы определенного радиуса через определенное время (рис. I.1.6). Далее с этой глубины в расчетное время надо отобрать пробу суспензии с частицами меньше (равного) заданного радиуса. По прошествии некоторого времени с этой же глубины уже можно отобрать пробу с частицами еще меньших радиусов. Расчет разницы между концентрацией частиц в первой и второй пробах даст концентрацию частиц определенного диапазона радиусов, то есть концентрацию некоторой фракции гранулометрических элементов. Зная объем сосуда, в котором происходит осаждение, и объем пробы, по концентрации суспензии не представляет труда рассчитать и содержание фракции в навеске почвы. Задавая размеры частиц и глубины отбора проб, рассчитывая по формуле Стокса время отбора и отбирая пробы, как показано на рис. I.1.6, можно определить содержания заданных по диаметру частиц фракций ЭПЧ, т.е. определить гранулометрический состав почв.



**Рис. I.1.6.** Схема определения фракций гранулометрических элементов по осаждению в стоячей воде и отбору проб с помощью пипетки: а) равномерно перемешанная суспензия почвы и б) отбор пробы мелких частиц через определенный промежуток времени

Отбор проб осуществляют с помощью специальной пипетки, конструкцию которой разрабатывали и усовершенствовали физики почв во многих странах мира. Поэтому она и носит название «Пипетка Качинского–Робинсона–Кёхня».

При применении пипет-метода обязательно отбирают пробы суспензии. Впрочем, не обязательно отбирать пробы суспензии. Можно использовать и другой принцип, без отбора пипеткой суспензии: измерять изменение плотности суспензии по мере осаждения частиц разной крупности. Изменение плотности также будет подчиняться закону Стокса, т.к. сначала понижение плотности суспензии будет происходить за счет выпадения самых крупных частиц, затем – все более мелких. Измерять плотность можно непрерывно на одной глубине с помощью ареометров, либо с помощью специальных приборов для определения гранулометрического состава дисперсных тел – седиграфов. Седиграфы используют принцип определения плотности суспензии по изменению интенсивного потока рентгеновского излучения, а в случае неокрашенных суспензий – изменения интенсивности светового потока при изменении плотности суспензии. Отметим, что последний метод (по измерению ослабления проходящего через суспензию светового луча) малоприменим для почв, так как в почвах практически всегда присутствует растворимая органика различных оттенков, дающая трудно учитываемую погрешность. В любом из методов (с использованием пипетки, седиграфа, ареометра) расчет происходит с использованием формулы Стокса, которая была выведена с рядом допущений, поэтому имеет особенности в приложении к почвенным измерениям, о которых следует помнить. Уточним эти особенности.

Частицы осаждаются независимо друг от друга. Это условие накладывает особенность на концентрацию суспензии – она не должна быть более 1.5–2%.

Частицы должны быть сферической формы, только в этом случае применимо уравнение Стокса. В почве имеются частицы самой разнообразной формы, вплоть до листоватой, пластинчатой. Поэтому в данном анализе мы определяем не реальный размер частиц, а так называемый «эффективный радиус», – радиус, который имели бы частицы, если бы они были округлой формы и их падение в жидкости подчинялось закону Стокса.

Закон Стокса применим для определенного диапазона диаметров частиц:  $>0.0001$  мм и  $<0.25$  мм. Как известно, частицы менее  $0.0001$  мм уже подвержены броуновскому, тепловому, движению. Их содержание определить по закону свободного падения Стокса невозможно. Кроме того, закон Стокса использует условие ламинарности движения частиц. Это накладывает условие определения частиц диаметром только менее  $0.25$  мм, так как более крупные, возможно, будут осаждаться с возникновением турбулентных явлений.

При падении частиц возникает трение, но это трение внутри жидкой фазы, а не на границе твердая частица–жидкость. Соответственно, используется вязкость раствора пирофосфата с поправкой на температуру, при которой происходило определение.

Следует отметить, что гранулометрический состав – один из основных факторов почвенного плодородия. Поэтому неоднократно делались попытки связать гранулометрический состав с потенциальным плодородием. Одна из наиболее удачных попыток принадлежит Н.А.Качинскому, который оценил в балльной системе почвы по гранулометрическому составу (см. Табл.3 Приложения). При этом дерново-подзолистые почвы имели наивысший балл для среднего или легкого суглинков, а вот черноземы – для тяжелых суглинков и глин. Чем же обусловлена такая связь почвенно-генетических типов с гранулометрическим составом? По всей видимости, опять-таки с формированием оптимального водно-воздушного режима: дерново-подзолистые почвы более легкого состава лучше дренируют воду, и в гумидной зоне в этом случае в почвах такого гранулометрического состава больше почвенного воздуха, который во влажных почвах может оказаться лимитирующим фактором. А вот в черноземной зоне лимитирующей, как правило, является влага. А глинистые почвы ее удерживают больше, чем почвы легкого состава. Поэтому тяжелые почвы получают наивысший балл среди черноземов. Однако, Н.А.Качинский учитывал и то, что черноземы хорошо структурированы. Структура оказывается специфическим и важнейшим почвенным агрофизическим фактором.

### **Структура почвы**

Если опять обратиться к рис. I.1.1., то совершенно очевидным становится тот факт, что почвенные частицы объединены в устойчивые образования, в агрегаты. Свойство почвы образовывать устойчивые агрегаты – это свойство почвенной структуры, пожалуй, самое важное структурное и функциональное свойство почвы. На этом же рисунке видно, что агрегат характеризуется тем, что связи внутри него, между отдельными частицами (в микроагрегате) или микроагрегатами (в макроагрегате) выражены сильнее, чем между агрегатами. Поэтому-то в почве и выделяются отдельные агрегаты, поэтому-то почвенная структура представлена рассыпчатым, зерноподобным агрегированным веществом, а не единой монолитной массой. Чем лучше выражена эта структура, чем устойчивее к воздействию воды и механических нагрузок почвенные агрегаты, тем лучше функционирует почва, тем выше и устойчивее ее продуктивность. Это вполне понятно: ведь хорошая структура определяет и хорошее проникновение влаги за счет пониженной плотности повышается ее порозность, и почва способна вместить и удержать большее количество воды, питательных веществ, в ней лучше движутся газы, активнее газообмен. Однако, это все качественные понятия. Существуют и количественные. Остановимся на характеристиках микроагрегатов (агрегатов диаметром менее  $0.25$  мм) и макроагрегатов или просто агрегатов (более  $0.25$  мм).

### **Микроагрегатный состав почв**

Традиционно распределение микроагрегатов по размерам (микроагрегатный состав почв) рассматривается совместно с гранулометрическим составом почв. Более того, фракции микроагрегатов по размерам аналогичны фракциям гранулометрических элементов. Это позволяет провести ряд оценок устойчивости микроструктуры. Однако возникает проблема выделения этих первичных агрегатных образований без их разрушения. Для

того чтобы выделить микроагрегаты, надо почву подвергнуть такому воздействию, чтобы разрушить макроагрегаты, при этом сохранив микроагрегаты. По всей видимости, это воздействие должно быть более слабое, чем используемое при гранулометрическом анализе. Именно поэтому при микроагрегатном анализе применяют концентрацию пиррофосфата натрия на порядок ниже (или его не используют вовсе) и очень слабое механическое воздействие. Эта физико-химическая диспергация позволяет разрушить макроагрегаты, но сохранить микроагрегаты.

Гранулометрический и микроагрегатный анализы будут отличаться прежде всего во фракциях ила и песка. Так как при микроагрегатном анализе мы не разрушили часть микроагрегатов, включающие и ил (см. рис. I.1.1), его количество меньше - он участвует в структурообразовании микроагрегатов. Разница в содержании ила между гранулометрическим и микроагрегатным составами будет говорить о структурообразующей роли почвенного ила. Напротив, - содержание песчаных фракций в микроагрегатном составе увеличится: к элементарным почвенным частицам песчаного размера прибавятся еще и микроагрегатики с диаметрами, равными песчаным компонентам. Вот на этих соотношения ила, песчаных фракций в гранулометрическом и микроагрегатном составах и построены основные количественные оценки микроагрегированности почв.

Коэффициент дисперсности по Качинскому ( $K_d$ , %):  $K_d = \frac{I_m}{I_z} 100$  %, где  $I_m$  и  $I_z$  –

содержание фракции ила (частицы  $<0.001$  мм) при микроагрегатном и гранулометрическом составах. Чем выше этот коэффициент, тем более дисперсна, легче пептизируется, менее микроагрегирована почва. Об этом говорит и само название коэффициента – коэффициент дисперсности. Вот некоторые классификационные градации почвенной микроагрегированности по этому показателю:

$<15$  – высокая микроструктурность

15–25 – хорошая

25–40 – удовлетворительная

40–60 – неудовлетворительная

$>60$  – весьма низкая.

Степень агрегированности по Бэйверу ( $A_r$ , %):  $A_r = \frac{P_m - P_g}{P_m} 100\%$ , где  $P_m$  и  $P_g$  –

содержания фракций песка (мелкого, среднего, крупного), т.е. частиц диаметром  $>0.05$  мм при микроагрегатном и гранулометрическом анализах. Но при использовании указанного коэффициента следует помнить, что чем он выше, тем лучше агрегирована почва. Возможна классификация микроструктурности почв на основании показателя  $A_r$ :

$>90$  – очень высокая микроагрегированность

80–90 – высокая

65–80 – хорошая

50–65 – удовлетворительная

35–50 – слабая

20–35 – весьма слабая

$<20$  – низкая

Приведенными показателями микроагрегированности можно пользоваться как при сравнении почвенных образцов, так и при характеристике микроагрегатной устойчивости конкретной почвы.

### **Структурный (макроагрегатный) состав почв**



В физике почв, структуру почвы оценивают количественно на основании распределения содержания агрегатов (воздушно-сухих и в воде) по их размерам. Аналогично тому, как это делается в гранулометрическом и микроагрегатном анализе, структура выражается в содержании фракций агрегатов определенного размера (диаметра). Первым количественным показателем структуры является содержание воздушно-сухих агрегатов различного размера. Получается этот показатель благодаря рассею воздушно-сухого почвенного образца в лаборатории на ситах с различным диаметром отверстий. Как правило, используют сита с диаметрами отверстий 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0.5 и 0.25 мм, соединяя их в последовательный набор – от большего диаметра к меньшему. На верхнее сито с диаметром 10 мм высыпается предварительно взвешенный средний образец почвы, сита встряхивают, и агрегаты располагаются в ситах соответственно их размерам: на верхнем – >10 мм (фракция > 10 мм), на следующем с диаметром 7 мм – фракция 7–10 мм, с диаметром 5 мм – фракция 5–7 мм и т.д., а в остатке будут микроагрегаты и элементарные почвенные частицы диаметром <0.25 мм – пылеватая часть почвы. Содержание каждой фракции легко можно рассчитать как соотношение этой фракции к взятой навеске. Естественно, что самые крупные агрегаты – глыбы и самые мелкие – пылеватая часть почвы указывают на неблагоприятное агрофизическое состояние почвенной структуры. А агрегаты размерами 10–0.25 мм – придают почвенной структуре ее уникальный вид в виде почвенных комочков и определяют почвенное плодородие. Поэтому их и называют *агрономически ценными*. Содержание агрономически ценных агрегатов – важнейший показатель ее состояния: чем выше их содержание, тем лучше почва. Недаром говорят: «Культурная почва – структурная почва». Итак, содержание агрономически ценных агрегатов – один из важнейших показателей структурного состояния почвы.

Другим показателем структуры является ее устойчивость к внешним воздействиям, среди которых наиболее существенным является воздействие воды. Почва должна сохранять свою уникальную комковатую зернистую структуру после обильных осадков и последующего легкого подсушивания, когда образуется не плотная непроницаемая для газов и воды корка, а вновь хорошо различимые почвенные комочки, агрегаты. Это качество структуры называют *водоустойчивостью*. Как может вода воздействовать на структурные отдельности, за счет чего их разрушать? Прежде всего, почвенные частицы смачиваются водой, вокруг них образуются пленки воды, которые их «раздвигают», или, как иногда говорят, «расклинивают» – это расклинивающее давление водных пленок. Кроме того, при увлажнении агрегата в него быстро входит вода, закупоривает в порах воздух, «защемляет» его. Так как вода всасывается почвой с огромной силой, с очень большим «всасывающим» давлением, то и в «защемленном» воздухе это давление весьма высоко. Он просто разрывает, «взрывает» почвенный агрегат. Такое взрывное воздействие защемленного воздуха наиболее часто встречается в природе при увлажнении сухой почвы. Противостоять этому воздействию могут лишь агрегаты, обладающие соответствующими связями между слагающими агрегат частицами, – т.е. быть водоустойчивыми.

Характеризуют это качество структуры также с помощью рассева на ситах, но не на воздухе, а в стоячей воде. Для этого предварительно (капиллярно) увлажненный почвенный образец переносят на верхнее сито (в данном случае – это сито с диаметром отверстий 5 мм, сита 10 и 7 мм не используются: такого размера водоустойчивых агрегатов в естественных почвах практически не наблюдается). После легкого покачивания набора сит в воде с каждого из них смывают водоустойчивые агрегаты и определяют их содержание. Как и в случае с ситовым анализом воздушно-сухих агрегатов – «сухого» просеивания, – получают распределение содержания водоустойчивых агрегатов по их размерам (диаметрам).

По содержанию агрономически ценных агрегатов, а также по содержанию водоустойчивых агрегатов с диаметрами  $>0.25$  мм характеризуют агрегированность и водоустойчивость структуры почвы.

По содержанию агрономически ценных агрегатов, размером  $10-0.25$  мм выделяют:

$>60\%$  – отличное агрегатное состояние

$60-40$  – хорошее

$<40\%$  – неудовлетворительное

Либо используют так называемый коэффициент структурности ( $K_{cmp}$ ):

$$K_{cmp} = \frac{\sum(10-0.25_{мм})}{\sum(> 10_{мм}, < 0.25_{мм})}$$

Этот коэффициент также основан на количестве агрономически ценных агрегатов, диапазоны  $K_{cmp}$ , используемые для качественной оценки структуры, составляют:

$>1.5$  – отличное агрегатное состояние

$1.5-0.67$  – хорошее

$<0.67$  – неудовлетворительное.

Оценку водоустойчивости структуры почвы проводят по агрегатному составу после «мокрого» просеивания. Например, по количеству агрегатов  $>0.25$  мм. Чем больше таких агрегатов получено в результате просеивания почвы в воде, тем лучше водоустойчивость структуры. Приводим классификационные диапазоны для качественной характеристики водоустойчивости структуры по сумме агрегатов размерами  $>0.25$  мм (см. также «Справочные материалы», табл.1 Приложения):

$<30\%$  – неудовлетворительная

$30-40$  – удовлетворительная

$40-75$  – хорошая

$>75\%$  – избыточно высокая.

Нередко требуется использовать данные ситового анализа в виде одного единственного показателя, а не в виде распределения агрегатов по фракциям. Так как распределение агрегатов по фракциям – это распределение, которое трудно описать единой математической зависимостью, используют следующие показатели в виде средневзвешенного диаметра агрегатов ( $СВД$ ) и среднегеометрического диаметра ( $СГД$ ):

$$СВД = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i M_i$$

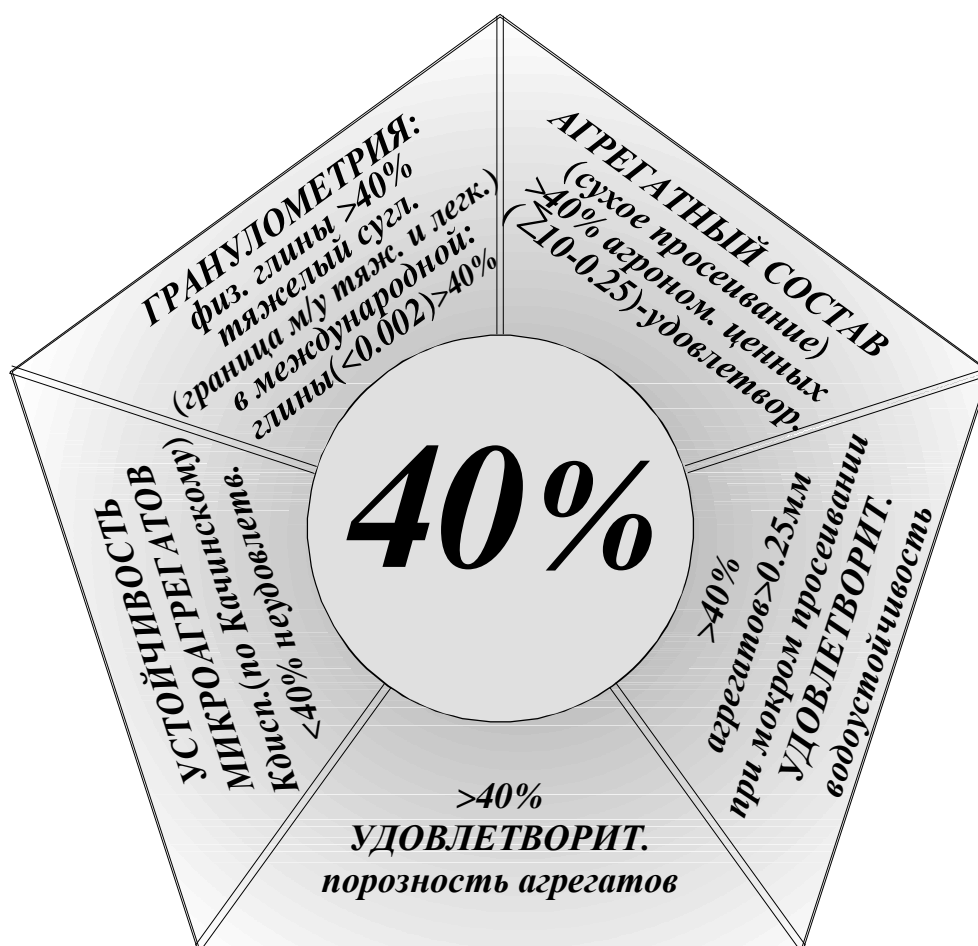
$$СГД = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n M_i \log \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \right]$$

В указанных выражениях везде  $M_i$  – весовой % фракции агрегатов со средним диаметром  $\bar{x}_i$ ,  $n$  – количество фракций. Нетрудно заметить, что выражение, стоящее в

знаменателе под знаком экспоненты в  $СГД$ ,  $\sum_{i=1}^n M_i$  – это общий вес образца. Чем выше

$СВД$  и  $СГД$ , тем в большей мере в структуре выражены крупные фракции, чем ниже – тем в большей мере пылевата структура. Отметим также, что  $СГД$  и  $СВД$  очень хорошо скоррелированы, – коэффициент корреляции близок к 0.9.

В заключение этого раздела о твердой фазе почвы обратим внимание на характерную для физики почв цифру – 40% и запомним её (рис. I.1.7) .

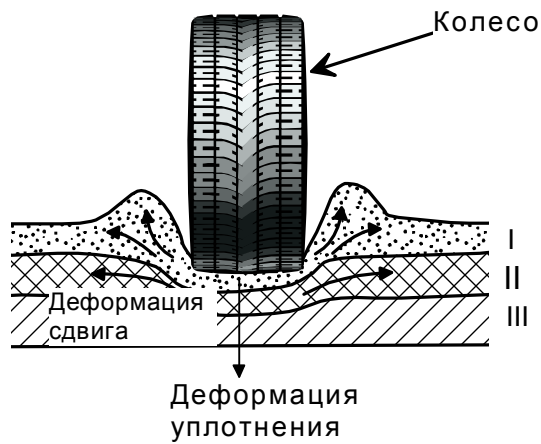


**Рис. I.1.7.** Важная в физике твердой фазы почв величина 40%, являющаяся разделом между водоустойчивой и неустойчивой структурой, между хорошим и удовлетворительным агрегатным состоянием, между удовлетворительной и неудовлетворительной микроагрегированностью, между суглинком средним и тяжелым (т.е. началом тяжелых почв).

Рассматривая структуру почвы, ее поровое пространство безусловно необходимо отметить и такую почвенную характеристику, как способность почвенных частиц двигаться друг относительно друга, сопротивляться силам сдвливания, проникновению различных предметов внутрь почвы. Эту область традиционно называют почвенной механикой, - наукой, которая изучает физико-механические свойства почв.

#### **Физико-механические свойства почв**

Механические воздействия на почву производятся силами, которые могут быть направлены перпендикулярно ее поверхности, тогда это будут силы сжатия или растяжения. Или под углом, «сбоку» к почве, - это силы сдвига, вызывающие движение почвенных слоев друг относительно друга, их внутреннее трение. Вообще-то в природных ситуациях эти силы (сжатия и сдвига) различить трудно, они обязательно сопровождают друг друга. Это хорошо иллюстрируется сжатием и сдвигом почвы под действием колеса техники (рис. I.1.7).



**Рис. I.1.8.** Деформации уплотнения и сдвига при движении транспортного средства по почве: I, II, III – почвенные слои

Из-за механического давления почва будет уплотняться непосредственно под колесом, а также передвигаться в стороны от воздействующего колеса (стрелки на рис. I.1.8). Изменения почвы под действием силы расположенной перпендикулярно к поверхности, т.е. непосредственно вниз от колеса – это уплотнение под действием напряжения сжатия или под действием нормального давления (напряжения), что подчеркивает расположение воздействующей силы по нормали к поверхности. Изменение почвы, наблюдающееся в стороне от воздействующего колеса, происходит за счет напряжения сдвига. Это давление (напряжение) заставляет почвенные слои перемещаться друг относительно друга, «скользить» один по другому. Для удобства рассмотрения ознакомимся поочередно с деформациями сжатия и сдвига.

### Деформация сжатия

Под действием нормального давления,  $P_s$ , почва уплотняется, т.е. уменьшается объем ее порового пространства. Если в поровом пространстве заключается вода, а она несжимаема, то сжатие будет определяться только оттоком влаги из этого порового пространства. Этот процесс называется *консолидацией*. Если же образец не насыщен влагой, то его уплотнение будет происходить за счет уменьшения объема порового пространства, заполненного воздухом, – это процесс уплотнения. А если образец сжимается за счет как уменьшения воздухоносной порозности, так и оттока воды, – это процесс *компрессии*. Итак, компрессия в целом включает процессы уплотнения и консолидации. Длительные механические воздействия на насыщенную почву в природе встречаются редко. Поэтому в реальных условиях нередко отождествляют компрессию с уплотнением, хотя в общем виде следует помнить формулу «компрессия = уплотнение + консолидация».

Параметрами, которые регистрируют изменение объема почвенного образца при сдвливании являются следующие:

- 1) величина *осадки* или уплотнения почвы – процента (доли) изменения линейных или объемных характеристик почвы: 
$$l_p = \frac{l_0 - l}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{или} \quad \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_0} [\%],$$
 где  $l$  и  $l_0$ ,  $V$  и  $V_0$  – измененная и начальная длина (высота), объем почвенного образца. Иногда используют модуль осадки – величину, аналогичную осадке или уплотнению,  $e_p$  – это величина уменьшения длины ( $\Delta l$ , в мм) образца исходной высотой ( $l_0$ ) в 1 м при приложении дополнительной нагрузки: 
$$e_p = 1000 \frac{\Delta l}{l_0} [\text{мм/м}];$$

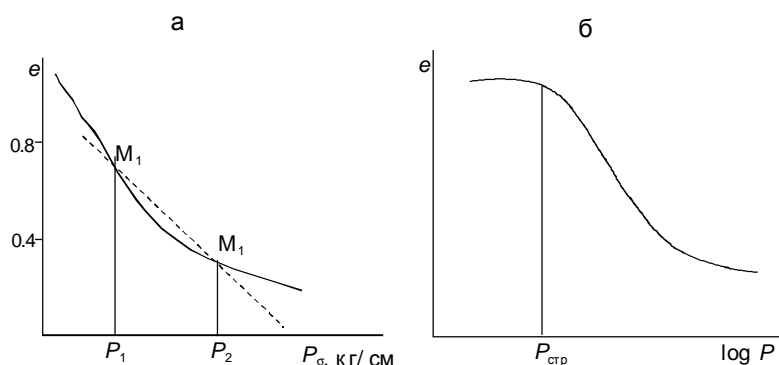
2) *коэффициент пористости,  $e$* , есть отношение объема пор к объему твердой фазы почвы:  $e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{тв. фазы}}}$ , или, если использовать традиционное для физики почв понятие

пористости  $e$ , то  $e = \frac{e}{1-e} = \frac{r_s - r_b}{r_b}$ . Коэффициент пористости является физически

более обоснованным параметром при оценке деформаций, чем традиционная пористость, т.к. в процессе деформаций необходимо относить все линейные или объемные изменения к независимому от этих воздействий, неизменному объему. А этот объем – объем твердой фазы. Только в этом случае возможен сравнительный анализ деформационных явлений – при постоянстве знаменателя в выражении коэффициента пористости:  $e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{тв. фазы}}}$ . Поэтому в данном разделе мы будем в

основном пользоваться коэффициентом пористости.

Итак, если подвергать почву уплотняющему нормальному давлению, ее поровое пространство будет уменьшаться. Для разных почв, для почв в разном состоянии это уплотнение будет различным. Поэтому зависимость изменения коэффициента пористости от нормального давления – это характерная для данной почвы зависимость, называемая компрессионной кривой. Вид этой кривой представлен на рис. I.1.9.



**Рис. I.1.9.** Зависимость коэффициента пористости почвы от нормальной нагрузки – «компрессионная кривая» – в линейных (а) и в полулогарифмических (б) координатах

На рис. I.1.9, а показано, что компрессионная кривая обычно имеет вид экспоненциально убывающей зависимости. Сначала, почвенная структура способна выдержать малые нагрузки. А затем небольшое приложенное давление заметно уменьшает поровое пространство. По мере уменьшения порового пространства почвенные частицы начинают все больше и больше контактировать друг с другом, почва сжимается все меньше и меньше, кривая выполаживается. Как правило, используют полулогарифмические координаты: «коэффициент пористости» – «log эффективной нагрузки» (рис. I.1.9, б). В этом случае деформационная часть кривой имеет вид, близкий к линейному. И значительно лучше выделяется начальный участок малого изменения порового пространства почв при малых нагрузках вплоть до некоторой величины  $P_{\text{стр}}$ . До  $P_{\text{стр}}$  структурные связи в почве способны выдержать прилагаемое давление. Это прежде всего ближние, сильнодействующие структурные связи. Если их нет, и связи представлены дальними коагуляционными, то этот участок не выражен, и кривая плавно экспоненциально убывает. При наличии ближних структурных связей, при достижении некоторого критического давления они разрушаются, порозность почвы резко убывает. Величину критического давления, при котором происходит резкое изменение порозности, называют «структурной прочностью» ( $P_{\text{стр}}$ ) и характеризуют соответствующей величиной давления «предкомпрессионным давлением»,  $P_{\text{precom}}$  ( $P_{\text{стр}} = P_{\text{precom}}$ ). Этой величиной

количественно оценивают внутрисочвенные структурные связи, которые не разрушаются под действием эффективных нагрузок в диапазоне напряжений от 0 до  $P_{precom}$ . Она имеет большое значение для оценки устойчивости природных объектов под действием внешних нагрузок.

#### Определения

Процесс уменьшения порозности не насыщенных водой почв под влиянием эффективного давления за счет уменьшения объема порового пространства, занятого воздухом, называется **уплотнением**.

**Консолидация** – процесс уплотнения первоначально насыщенной почвы путем отбора (медленного «выжимания») воды при свободном ее оттоке. Определяется скоростью оттока воды.

**Компрессия** – процесс уплотнения не насыщенной влагой воды, при котором происходит изменение порового пространства почв как за счет уменьшения объема воздухоносных пор, так и за счет оттока влаги из порового пространства. Компрессия почвы включает процессы уплотнения и консолидации. Деформация сжатия характеризуется **компрессионной кривой**: зависимостью коэффициента пористости от эффективного давления (сумма нормального механического давления и всасывающего давления почвенной влаги). Оценивается по индексу уплотнения ( $C_c$ ) или коэффициенту уплотнения ( $a$ ), показывающему изменение порового пространство почвы на единицу изменения давления [1/Па, 1/атм и проч.].

Величина критического давления, при которой происходит первоначальное изменение порозности, и начинают проявляться деформационные изменения, называется **«структурной прочностью»** ( $P_{cmp}$ ) и характеризуется соответствующей величиной давления – **«предкомпрессионным давлением»**,  $P_{precom}$  ( $P_{precom} = P_{cmp}$ ). Данная величина характеризует внутрисочвенные структурные связи, которые не разрушаются под действием небольших эффективных нагрузок.

Линейная часть компрессионной кривой (в полулогарифмических координатах) характеризует способность, «податливость» почвы к уплотнению. Эту часть кривой можно описать с помощью линейного уравнения типа  $e = e_1 - C_c \log(P'_s)$ , или

$C_c = -\frac{de}{d \log P'}$ . Величина  $C_c$  – это индекс уплотнения, показывающий, насколько

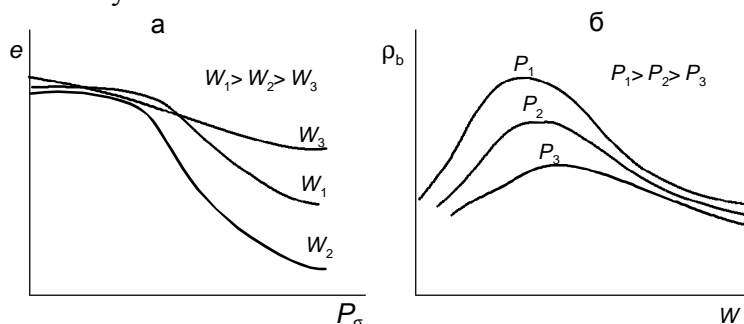
изменится поровое пространство при изменении логарифма эффективного давления. Учитывая, что коэффициент пористости при уплотнении зависит только от плотности

почвы,  $\rho_b$ , индекс уплотнения нередко записывают в виде  $C_r = -\frac{d\rho_b}{d \log P'}$ . Кроме того, в

большинстве практических случаев размах применяемых напряжений не слишком велик, что позволяет считать близкой к линейной и деформационную часть компрессионной кривой в линейных координатах (рис. XVI.2, а). В этом случае линейное компрессионное уравнение будет иметь вид  $e = A - aP'_s$ , где  $A$  – некоторая константа, характеризующая исходную пористость грунта,  $a$  – коэффициент уплотнения, имеющий размерность [1/Па] или [см<sup>2</sup>/г]. Этот коэффициент, так же, как и индекс уплотнения, характеризует способность почвы уплотняться под внешним воздействием при условии небольшого диапазона действующих напряжений и вида деформационной части компрессионной кривой, близкой к линейной. Коэффициент уплотнения во многом будет зависеть от фундаментальных свойств почвы (гранулометрический и минералогический составы, агрегированность и др.), а также от исходной порозности и содержания воды в поровом пространстве. Если воды в порах совсем нет, то твердые почвенные частицы соприкасаются друг с другом, эти контакты достаточно прочные, чтобы выдержать

солидные сдвливающие усилия. А если в поровом пространстве присутствует влага, то, почвенные поры заполнены водой, играющей роль определенной смазки для почвенной частицы. В этом случае уплотнение будет существенно зависеть от содержания влаги в почве.

Итак, сухие почвы практически не изменяют своего объема под действием внешних нагрузок – почвенные частицы находятся в непосредственном контакте друг с другом, их движение друг относительно друга весьма затруднено при отсутствии влаги. По мере увеличения влажности частицы получают возможность двигаться друг относительно друга. И чем влажнее, тем легче это происходит. При некоторой влажности достигается максимум уплотнения почвы, так как при дальнейшем увеличении влажности почвы сжимаются хуже – поровое пространство постепенно заполняется водой, начинают преобладать медленные процессы консолидации. Поэтому в определенном, среднем (на рис. I.1.10, а – влажность  $W_2$ ) диапазоне влажностей компрессионные кривые лежат ниже кривых для более влажных или более сухих образцов (рис. I.1.10 а). Отмеченное крайнее положение кривой означает, что при этой влажности происходит наиболее заметное уменьшение пористости, прежде всего за счет доли порового воздуха. В этом диапазоне почва в наибольшей степени подвержена механическим нагрузкам. Как правило, в почвоведении принято использовать не величину коэффициента пористости, а величину плотности, которую мы непосредственно определяем в поле. В этом случае зависимость будет иметь максимум плотности в некотором диапазоне влажностей (рис. I.1.10, б). А при различных уплотняющих воздействиях уже появится семейство кривых с одним максимумом.



**Рис. I.1.10.** Компрессионные кривые для почвы при различной влажности (а) и зависимости плотности от влажности при различных уплотняющих нагрузках (б)

Но что характерно – чем слабее уплотняющее воздействие, (1) тем меньше плотность при максимальном уплотнении и (2) тем при большей влажности наблюдается этот максимум (рис. I.1.10, б). Если первый отмеченный факт тривиален, то второй – весьма интересен. Получается, что большие нагрузки способны «сломать» связи, разрушить структуру порового пространства уже в довольно сухих образцах, уплотнить их до предельных значений для данного уплотняющего воздействия. Небольшие же, напротив, не способны разрушить структурные связи при низкой влажности, и для изменения порового пространства требуется высокая влажность. Только при высокой влажности создаются условия для уплотнения почвы. Поэтому столь важно производить обработку почвы в определенном состоянии влажности, не заезжать в поле при высокой влажности. Определенные рекомендации в отношении влажности и соответствующего давления тракторов приведены в «Справочных материалах» (табл.4 Приложения).

Рассмотренное влияние влажности представлено в схематичном виде на рис. I.1.10,б. Но это действительно «схематическое» представление. В каждом конкретном случае, для каждого почвенного образца эти кривые будут различаться и изменяться в соответствии с гранулометрическим составом, структурой почвы, содержанием органического вещества. Общие правила здесь таковы: заметному уплотнению подвергаются лишь почвы тяжелого гранулометрического состава: средние и тяжелы суглинки, глины, т.е. почвы, содержание

физической глины в которых превышает 30-40%. Кроме того, если почвенные агрегаты водоустойчивы, прочные и достаточно плотные, то почва подвергается меньшему уплотнению. Влияние органического вещества на уплотнение сказывается прежде всего в том, что чем выше содержание почвенной органики, тем почва легче уплотняется. Это вполне понятно: органическое вещество, также как вода в почве, может служить определенной «смазкой», и само легко уплотняется. Но в данном случае роль органического вещества состоит прежде всего в том, что при его высоком содержании почва может легко разуплотняться, снова переходить в рыхлое состояние. Это особенно важно для почвенных агрегатов, которые являются хранилищем питательных веществ, «домом» почвенной биоты. А их-то разрыхлить никакой вспашкой, культивацией невозможно. Только почвенная биота, разнообразно поглощая и превращая почвенное органическое вещество, может разрыхлить почвенные агрегаты. Поэтому столь важно внесение органических удобрений, в том числе зеленых органических удобрений для разрыхления почвы, составляющих ее почвенных агрегатов.

### Деформация сдвига

Если к почвенному образцу прикладывать боковое усилие, тангенциальное давление ( $P_t$ ), то почвенные слои будут смещаться друг относительно друга. При этом будет возникать сопротивление, называемое *сопротивлением сдвига*. Это сопротивление имеет природу внутреннего трения, возникающего за счет сил сцепления почвенных частиц, агрегатов друг с другом, обозначается как  $t_e$ , имеет размерность давления.

#### Определения

**Сопротивление сдвигу** ( $t_e$ , Па, атм и проч.) – это давление, оказываемое почвой при действии касательных (тангенциальных) напряжений.

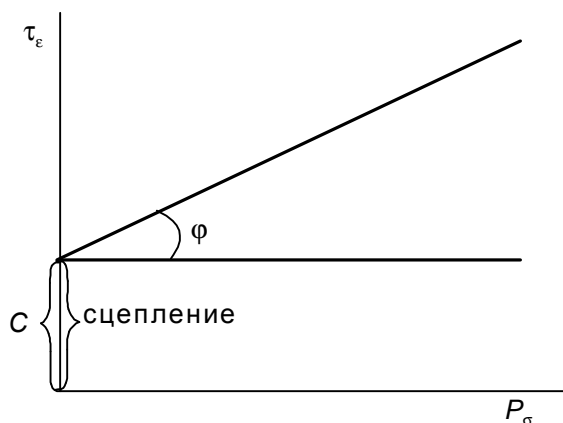
**Сцепление** ( $C$ , Па, атм и проч.) – это взаимодействие между отдельными почвенными частицами, обусловленное, как правило, жесткими необратимыми кристаллизационными и смешанными связями. Это часть сопротивления сдвигу, которая не зависит от нормального давления.

Как уже указывалось выше, сдвиговые деформации в почве возникают совместно с деформациями сжатия (вспомним рис. I.1.8 – деформации почвы под колесом). Поэтому в самом общем случае сопротивление сдвигу будет определяться еще и нормальным давлением,  $P_s$ , которое будет влиять на величину внутреннего трения, и независимой от нормального давления величиной сцепления. Эта взаимосвязь выражается классическим уравнением Кулона:

$$t_e = P_s \operatorname{tg} j + C,$$

где  $P_s$  – нормальное давление [кПа, атм],  $C$  – сцепление [кПа, атм],  $\operatorname{tg} j$  – коэффициент внутреннего трения [безразмерная величина]. Из этой формулы становится понятным смысл коэффициента внутреннего трения, – это коэффициент пропорциональности между вертикальным уплотняющим давлением и частью сопротивления сдвигу, обусловленного только возрастанием внутреннего трения за счет этого уплотняющего воздействия. Это хорошо видно из рис I.1.11, представляющего график зависимости сопротивления сдвигу от нормального давления – прямой, имеющей наклон равный  $j$ , и отсекающей на оси ординат постоянную величину – величину сцепления,  $C$ . Физический же смысл этого параметра заключается в том, что по поверхности скольжения образуется тонкая зона разрыхления, частицы трутся друг о друга, что отражается в величине  $\operatorname{tg} j$ , который может быть больше единицы (т.е. увеличивать воздействие нормальной силы) в плотных, с призматической блочной структурой почвах, в песках, и меньше единицы – в рыхлых глинах.



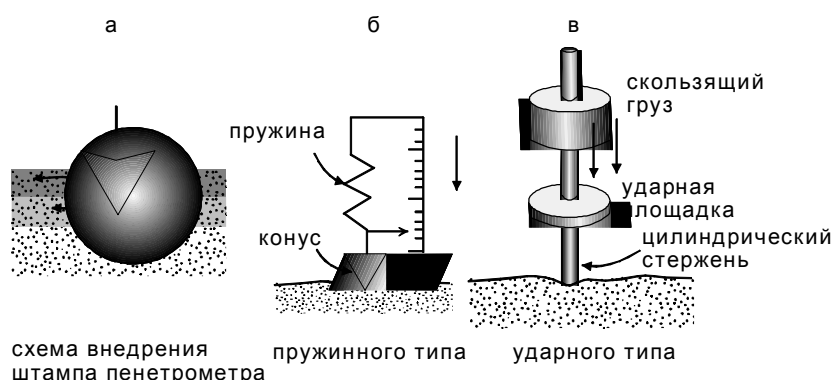


**Рис. I.1.11.** Зависимость сопротивления сдвигу от нормального давления

### Сопротивление пенетрации

В почвоведении всегда была потребность быстро и точно оценить состояние почвы в отношении условий проникновения в нее корней растений, сельскохозяйственных орудий и проч. Поэтому было предложено понятие «сопротивление пенетрации почвы (грунта),  $P_{pen}$ » — сопротивление почвы внедрению в нее металлического зонда цилиндрической или конусообразной формы небольшого диаметра (обычно от 1 до 5 мм). Традиционно до сих пор в почвоведении в отношении сопротивления пенетрации используют и термин «твердость почвы». Таким образом, сопротивление пенетрации и твердость — термины-аналоги, но использование термина «сопротивление пенетрации» физически более строго, так как *твердость* — сопротивление материала вдавливанию или царапанию, не является физической постоянной, а представляет собой сложное свойство, зависящее как от прочности и пластичности материала, так и от метода измерения.

Определения сопротивления пенетрации проводят специальными приборами — пенетрометрами (твердомерами). При внедрении зонда пенетрометра в почву происходят разнообразные процессы. Лучше всего это рассмотреть на схеме (рис. I.1.12 а). Как видно, при внедрении конусного зонда наблюдается: уплотнение почвы, деформации сдвига, а также трение металла о почву. Поэтому получаемый параметр несет в себе разнообразную информацию и, в большинстве случаев, важен как самостоятельная величина — сопротивление пенетрации.



**Рис. I.1.12.** Схема внедрения конического штампа пенетрометра (а) и основные типы пенетрометров: пружинный (б) и ударного типа (в)

В результате, при использовании пенетрометров мы экспериментально определяем силу, которая необходима для внедрения штампа (конусного либо цилиндрического) в почву. Эту силу можно измерить с помощью пружины, как в пенетрометре МВ-2 или конструкции Н.А.Качинского (рис. I.1.12, б). В этом случае следует обратить внимание на

тарировку прибора. Необходимо регулярно тарировать пружинные пенетromетры, прикладывая известные грузы к пружине (или сдвигая пружину и одновременно измеряя сдвигавшую нагрузку, например, на весах, в кг или г) и снимая соответствующие показания со шкалы прибора. Значения регистрируемой силы ( $F$ ) следует относить к постоянной площади цилиндрического или основания конусного штампа ( $S$ ), получая значения сдвигавшего напряжения (или давления):  $P = \frac{F}{S}$ .

Зависимость показаний прибора от придаваемой нагрузки должна быть линейной, что позволяет пользоваться одной величиной – постоянной пенетromетра.

Сопротивление пенетрации для приборов ударного типа (рис. I.1.11, в) рассчитывается по массе скользящего груза, высоте и количеству падений. Используется следующая формула:  $P_{pen} = n \frac{m \cdot g \cdot h_1}{S \cdot h_2}$ , где  $n$  – количество падений груза массой  $m$  ( $m \cdot g$  – вес груза, кг)

с высоты  $h_1$ ,  $S$  – площадь погружаемого в почву стержня,  $h_2$  – глубина внедрения стержня. Получаемая размерность – [кг/см<sup>2</sup>].

Сопротивление пенетрации зависит от разнообразных почвенных свойств, так же, как и компрессия, и сопротивление сдвигу. Прежде всего, это влажность, при которой производят измерение, ведь, как правило, измерение производят в полевых условиях. Эта зависимость,  $P_{pen}(W)$ , весьма интересна, – она нелинейная, зависит от агрегированности почвы. В песчаных и хорошо структурированных почвах по мере подсыхания почвы сопротивление пенетрации имеет максимум при некоторой влажности. А при дальнейшем иссушении сопротивление пенетрации убывает, так как почва распадается на отдельные песчинки или агрегаты. А вот в бесструктурной почве или почве с призматической структурой сопротивление пенетрации возрастает при уменьшении влажности практически линейно.

Кроме того, сопротивление пенетрации, конечно же, будет зависеть от таких фундаментальных свойств, как гранулометрический состав, минералогический состав и состав ППК, агрегатный состав, и, наконец, плотность почвы. Из общих закономерностей отметим следующие. Сопротивление пенетрации увеличивается при одной и той же влажности (давлении влаги) в почве:

- в песчаных почвах (песок ведь непластичен, обладает жестким каркасом);
- при увеличении плотности почвы;
- при уменьшении доли  $\text{Na}^+$  в ППК;
- при снижении доли смектитовых минералов в составе глинистой части почвы;
- при снижении содержания агрономически ценных агрегатов в структуре почвы.

Даже это весьма упрощенное и схематичное представление о зависимости сопротивления пенетрации от почвенных свойств указывает на его важность для оценки почв. Именно поэтому измерение этого свойства является одним из обязательных при агрофизических обследованиях почвенного покрова. Однако всегда следует учитывать состояние влаги в почве, ее влажность, а также метод (прибор), с помощью которого производится измерение этой важной характеристики. Критическим значением сопротивления пенетрации, при котором затруднено проникновение корней в почву, и растения начинают заметно страдать считается величина 3 МПа ( $\approx 30$  кг/см<sup>2</sup>). Хотя в ряде стран приняты более строгие нормы, до 0.5 МПа (см. Табл.6 Приложения) Более подробные классификации этого свойства – в разделе «Справочные материалы» (Табл.6 и 7 Приложения).

**Сопротивление пенетрации почвы** – сопротивление почвы внедрению в нее зонда цилиндрической или конусообразной формы небольшого диаметра ( $P_{pen}$ , кПа или другие единицы давления). Определяется с помощью специальных приборов – пенетromетров, которые необходимо тарировать, экспериментально находя,

постоянную прибора – величину напряжения сжатия или растяжения на единицу шкалы прибора (в Па/см, или (кг/см<sup>2</sup>)/см, т.е. [давление/длина].

**Сопротивление пенетрации** характеризует способность почвы противодействовать проникновению в нее не только агротехнических орудий, но и корней растений. Повышенное сопротивление пенетрации указывает на переуплотненность почвы. Критическое значение  $P_{pen}$  для суглинков составляет около 3 МПа.

## Литература

В а д ю н и н а А. Ф., З. А. К о р ч а г и н а. Методы исследования физических свойств почв. М.Агропромиздат, 1986.

В о р о н и н А.Д. Основы физики почв. Изд-во Моск.ун-та. 1986.

Изменение агрофизических свойств почв под воздействием антропогенных факторов. Научные труды Почвенного института им. В.В.Докучаева. М., 1990.

К а ч и н с к и й Н.А. Физика почвы Ч.1. М. 1965.

М а н у ч а р о в А. С., А б р у к о в а В. В., Ч е р н о м о р ч е н к о Н. И. Методы и основы реологии в почвоведении. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1990.

Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств почв. Изд-во Моск.ун-та, 2001. Под ред. Е.В.Шеина.

С е р г е е в Е. М., и др. Грунтоведение. М.:Изд-во Моск.ун-та, 1971.

Физико-механическая механика природных дисперсных систем. Под ред. Е.Д.Щукина и др. М.: Изд-во Моск.ун-та. 1985. 266 с.

## Глава I.2. Влажность и водные свойства почв

### Влажность почв

В предыдущей главе I.1 мы коснулись понятия влажности почвы, отметив, что влажность в почвоведении определяется как количество воды, приходящееся на единицу веса абсолютно сухой почвы. Важно подчеркнуть, - расчет влажности ведется именно на абсолютно сухую навеску. Поэтому если встречаются значения влажности более 100% (при процентном выражении доли воды к весу абсолютно сухой почвы), значит, речь идет об оторфованных почвах, торфах, лесных подстилках, степном войлоке и т.п., когда вес абсолютно сухого вещества значительно меньше, чем вес влаги, вмещающейся в нем. Обычные же минеральные почвы имеют диапазон изменения влажности от долей до 50 процентов к весу.

Существует три способа представления данных о влаге в почве. Первого мы уже коснулись - это отношение массы воды к массе абсолютно сухой почвы, т.е. к массе твердой фазы ( $[г/г]$  или, если умножить на 100, то в  $[%]$ )

$$W = \frac{m_w}{m_s} \text{ [г/г или \% к весу]}; W = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}}.$$

Здесь  $m_w$  – масса воды,  $m_s$  – масса твердой фазы,  $m_{вл}$  – масса влажной почвы,  $m_{сух}$  – масса сухой почвы (равная  $m_s$ ),  $W$  – весовая или массовая влажность почв (г/г или % к весу при умножении на 100).

2-й способ выражения – это отношение массы (или объема) воды к объему почвы ( $V_t$ ), – объемная влажность ( $\theta$ ,  $см^3/см^3$ ):

$$q = \frac{m_w}{V_t}.$$

Нетрудно показать, что объемная и весовая влажности взаимосвязаны через плотность почвы ( $r_b$ ):  $q = W r_b$ .

Существует еще одна очень важная форма выражения влаги – в виде запасов влаги ( $3B$ ) в конкретном слое почвы:

$$3B = \frac{W r_b h}{100} \text{ [см водного слоя]}, \text{ где } h \text{ – мощность слоя в см, } r_b \text{ – плотность почвы в г/см}^3, W$$

– влажность весовая в %.

Это балансовая форма представления данных по влажности. Используется она в основном для характеристики запасов влаги, балансовых расчетов, для выражения всех составляющих водного баланса в одних единицах.

С помощью указанных трех способов выражения влажности почвы всегда можно рассчитать количество воды в почве, приходные и расходные статьи водного баланса почвы. Но для оценки состояния влаги, ее подвижности, ее доступности для растений этого недостаточно (существует образное выражение “Вода в почве – это совсем не то же самое, что вода в ведре”). Вода в почве представлена различными формами, характеризующимися, прежде всего, различной степенью ее связи с твердой фазой почвы. Это тоже одна из специальных гипотез в физике почв – учение о почвенно-гидрологических константах, которое формировалось в основном в рамках отечественной физики почв. Такие известные российские физики почв, как А.А.Роде, С.И.Долгов, Н.А.Качинский, неоднократно в специальных экспериментах доказывали, что вода в почве при различном ее содержании (влажности) далеко не равнозначна по своим свойствам. Более того, одно и то же влагосодержание (влажность) в различных почвах может быть различно по подвижности, по доступности для растений. Например, если влажность почвы равна 15% к массе почвы, то из песчаного образца с такой влажностью вода может свободно вытекать, и будет, доступна растениям. Но на тяжелосуглинистой или глинистой почве при такой влажности растения будут испытывать недостаток влаги и

будут засыхать. Получается, что абсолютная величина влажности без сопутствующих знаний о других фундаментальных свойствах почв, дает ограниченную информацию. В связи с этим и было развито учение о почвенно-гидрологических константах, как о состояниях воды в почве, отличающихся по скорости ее передвижения в почве, возможности потребления растениями и другим функциональным характеристикам почвенной влаги.

#### *Определения*

**Влажность (весовая)** – количество воды, приходящееся на единицу массы абсолютно сухой почвы.

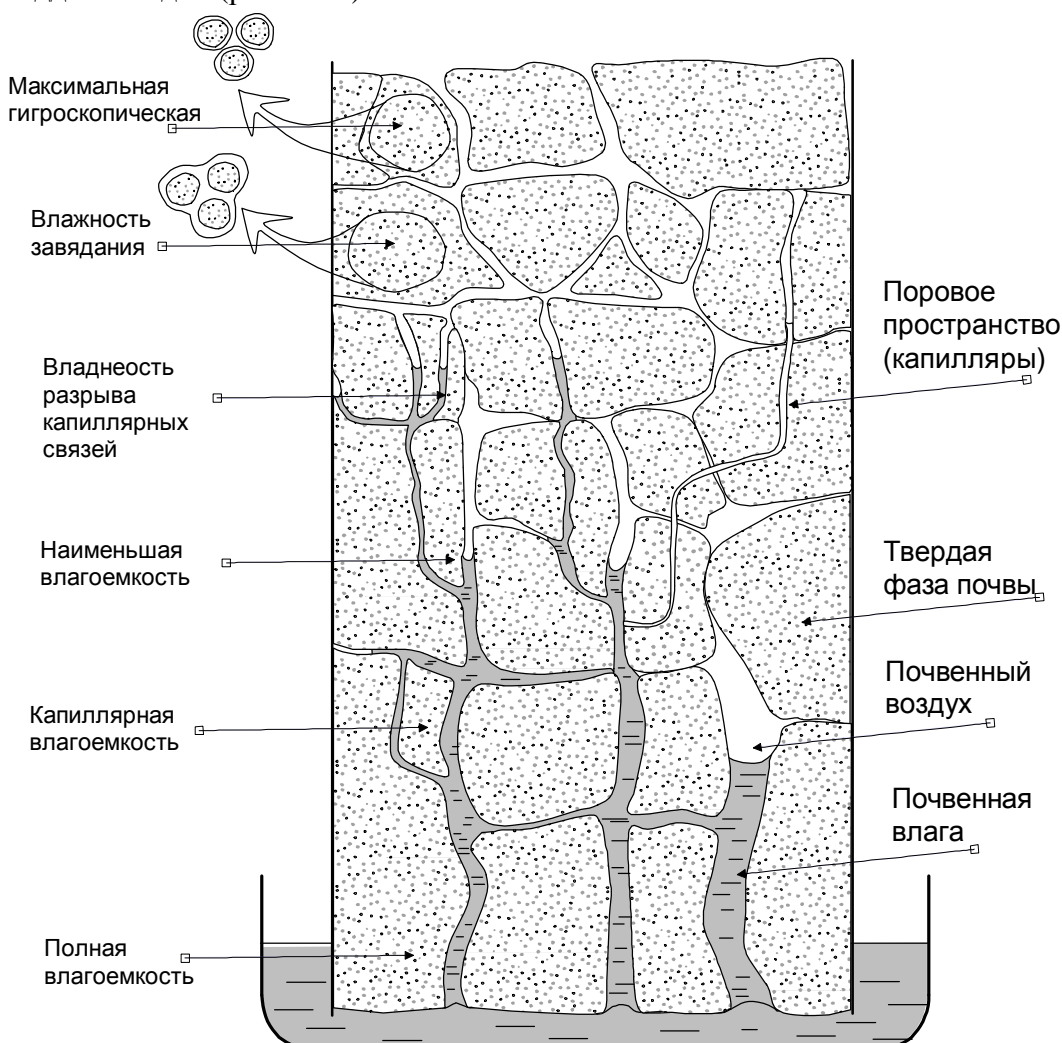
**Влажность (объемная)** – количество воды, приходящееся на единицу объема абсолютно сухой почвы.

**Влагоемкость** – максимальное количество воды, удерживаемое в почве силами определенной природы. Понятие влагоемкости является основой учения о почвенно-гидрологических константах.

**Почвенно-гидрологическая константа** – характерная влажность почвы, определяемая по ее состоянию или по состоянию контактирующих с почвой объектов и используемая в практических почвенно-физических, гидрологических, мелиоративных расчетах.

#### **Почвенно-гидрологические константы**

Представим себе весьма большой, высокий почвенный монолит, который помещен в поддон с водой (рис. 1.2.1).



**Рис. I.2.1.** Схема формирования почвенно-гидрологических констант.

Начнем с условий, когда все поровое пространство заполнено водой. Эта величина влажности называется *полной влагоемкостью* или *водовместимостью*,  $W_s$  или  $q_s$ . Теоретически величина  $q_s$  должна быть равна порозности,  $e$ , так как обе они выражают объем порового пространства (заполненного или незаполненного водой) в отношении всего объема образца. Практически такого соответствия достичь весьма трудно даже в лабораторных условиях: в образце всегда останутся пузырьки воздуха, всегда будет присутствовать во всевозможных кавернах так называемый «защемленный воздух». Поэтому величина водовместимости всегда несколько меньше порозности. В природных условиях величина водовместимости наблюдается в зоне грунтовых вод, верховодки.

Как известно, над уровнем грунтовых вод располагается верховодка. В верховодке влага содержится в капиллярах, которые в нижней своей части находятся в грунтовой воде. Поэтому, по образному выражению классиков физики почв, – это «капиллярно-подпертая вода». Влажность, соответствующая этому состоянию воды носит название *капиллярной влагоемкости*, КВ или влажности при КВ,  $q_{кв}$ . Здесь поровое пространство, кроме заполненных водой капилляров, уже будет содержать некоторое количество воздуха. Его количество будет равно  $e_{кв} = e - q_{кв}$ . Строго говоря, в пределах капиллярной каймы не наблюдается постоянной влажности. Ведь в нижней части вода содержится в крупных капиллярах, и по мере продвижения вверх по капиллярной кайме – все в более тонких. Соответственно, от низа к верху капиллярной каймы и влажность будет изменяться. Поэтому величина капиллярной влагоемкости строго не определена, это некоторая усредненная влажность, свойственная капиллярной кайме, «капиллярно-подпертой влаге».

А вот если грунтовые воды опустились, находятся глубоко, а влага из почвы свободно стекает, дренируется под действием гравитационных сил, то в почве останется влага, удерживаемая только капиллярными силами. Эта влажность называется *наименьшей влагоемкостью*, НВ или  $q_{нв}$  (синонимы: предельно полевая влагоемкость, полевая влагоемкость, field capacity). Эта величина определяется физически уже более строго, чем капиллярная влагоемкость: если почву при условии свободного оттока и отсутствия слоистости сначала насытить водой до водовместимости, а затем подождать, когда стечет вся вода, способная передвигаться под действием сил гравитации, останется вода, удерживаемая капиллярными силами. При достижении равновесия в почве будет наблюдаться величина влажности, соответствующая наименьшей влагоемкости. Это уже определенный качественный критерий: если влажность в почвенном горизонте будет выше НВ, то из него влага будет перетекать в нижележащий до тех пор, пока не будет достигнута в верхнем слое влажность, равная НВ. Этим качеством НВ пользуются при расчетах перетекания влаги из слоя в слой. Кроме того, эта равновесная влажность, которую возможно определить в поле, она наблюдается в почве весной, после таяния снега, стекания гравитационной воды и представляет собой весенние запасы влаги. Именно потому, что НВ представляет количество воды, которое удерживается почвой после осадков или полива, эта величина является основой большинства гидрологических, мелиоративных расчетов. Оценочные критерии этой величины для тяжелых и легких почв приведены в табл.5 Приложения.

Таким образом – наименьшая влагоемкость – важная в агрофизике почвенно-гидрологическая константа. Она важна и тем, что характеризует содержание в почве воздуха в этот момент. Характеристическая величина воздухоудержания при влажности НВ носит название «*воздухоемкости*»:  $e_{возд} = e - q_{нв}$ . Ниже приведены оптимальные диапазоны воздухоемкости для различных по гранулометрии почв:

песчаные – 20-25%

суглинистые – >15-20%

глинистые –  $>10\%$ .

Если величина воздухоемкости будет ниже указанного оптимума, то в почве будут наблюдаться неблагоприятные, близкие к анаэробным условия. Может это происходить, например, при уплотнении почв, когда заметно уменьшается поровое пространство почв, и при некоторых других процессах.

Итак, мы достигли такого состояния почвы, когда влага содержится только в капиллярах. Эта влага легко передвигается из одной точки почвы в другую под действием капиллярных сил, легко переносит ионы растворимых солей. Однако, по мере иссушения почвы влага остается во все более тонких капиллярах, движение в них становится медленнее и в какой-то момент влажности замедляется весьма резко и заметно. Качественно этот момент может характеризоваться прерыванием сплошной сети капилляров. В отдельные капилляры входит воздух, гидравлическая связь между капиллярами нарушается, что и отмечается резкой потерей подвижности воды. По предложению А.А.Роде и М.М.Абрамовой эта величина влажности получила название «влажности разрыва капиллярной связи» - ВРК. Эта почвенно-гидрологическая константа весьма важна. Она характеризуется заметным уменьшением подвижности почвенной влаги, т.к. почвенная капиллярная влага уже не представляет собой единой гидравлической связи, а распадается на отдельные капилляры и остается в виде пленок. Движение воды, ее доступность для растений резко снижаются. И хотя общепринятых методов определения ее нет, иногда эту величину считают близкой к 70% от наименьшей влагоемкости для суглинистых почв, а для песчаных и супесчаных – около 50–60% от НВ.

Представим далее, что на нашей почве росли бы растения. До сих пор они чувствовали себя достаточно влагообеспеченными. И при ВРК они еще явно не страдают от недостатка влаги. Однако предположим, что почва продолжает иссушаться, терять влагу. В некоторый момент у растений появятся первые признаки завядания, они исчезнут, если воздухообеспеченность улучшится. Если же продолжать иссушение, то будет достигнут тот момент, когда влажность почвы понизится настолько, что растения приобретут признаки устойчивого завядания. Наступит почвенная засуха. Влажность в этот момент будет равна влажности устойчивого завядания растений или просто *влажности завядания*, ВЗ. Это также важная гидрологическая константа, указывающая, что в почве больше не содержится доступной для растений влаги. Если и есть вода, то она недоступна для растений, это уже непродуктивная влага. Эта величина экспериментально определяется методом вегетационных миниатюр, когда растения (как правило, ячмень или овес, впрочем, в США принят подсолнечник) выращивают в небольших стаканчиках емкостью около  $100\text{ см}^3$  до стадии третьего листа (рис. VI.8). Поверхность почвы прикрывают от испарения песком и парафином и прекращают их полив. Когда обнаруживаются признаки завядания, растения ставят на ночь во влажную камеру. И если после нахождения во влажной атмосфере потеря тургора будет заметна, – это означает, что в почве достигнута влажность, соответствующая ВЗ (более подробно см. А.Ф.Вадюнина, З.А.Корчагина, 1986).

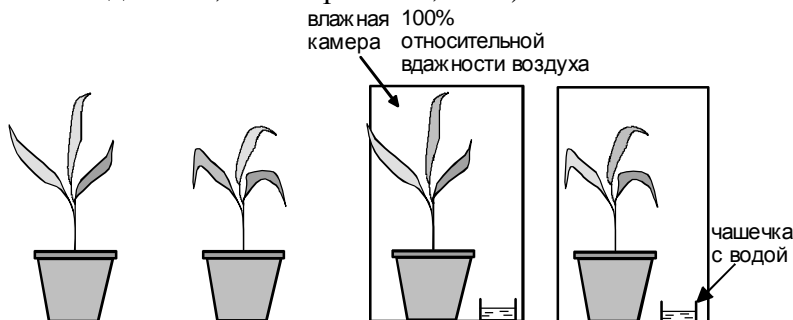


Рис. I.2.2. Определение влажности завядания методом вегетационных миниатюр.

Если и дальше иссушать почву или двигаться вверх по почвенному монолиту ближе к его поверхности (рис. I.2.1), то у самой его поверхности будет наблюдаться влажность, соответствующая максимальной гигроскопической влажности. Эта величина – также «рубежная», характеризующая наличие в почве адсорбированной, прочносвязанной сорбционными силами твердой фазы влаги. Эта величина условна, определять ее можно только в лаборатории, в условиях равновесия почвы с парами воды при их содержании в окружающей атмосфере, равными 98%. Поэтому, *максимальная гигроскопическая влажность* (МГ,  $W_{mc}$ ) – влажность почвы при нахождении ее в атмосфере с относительной влажностью 98%, т.е. максимальное количество, которое почва способна сорбировать из близкого к насыщенному парами воды воздуха.

И, наконец, самая низкая влажность, которая может наблюдаться только в почвенных образцах которые находятся в условиях лаборатории и очень редко в природных условиях. Это *гигроскопическая влажность* (ГВ,  $W_c$ ) – влажность почвы, свойственная образцу в атмосфере лаборатории. Относительная влажность воздуха (или относительное давление паров воды) в лаборатории – величина хоть и заметно колеблющаяся (от 30 до 80%), но не сильно изменяющая ГВ. Она нужна для расчета массы абсолютно сухой навески ( $m_{a-c}$ ) по данным о массе воздушно-сухой (т.е. в

атмосфере лаборатории,  $m_{g-c}$ ) навески:  $m_{a-c} = \frac{m_{g-c}}{W_c + 1}$ , если  $W_c$  выражена в [г/г] или

$m_{a-c} = \frac{m_{g-c} \cdot 100}{W_c + 100}$  при использовании выражения  $W$  в %.

#### Почвенно-гидрологические константы

**Полная влагоемкость (водовместимость, ПВ)** – наибольшее количество воды, содержащееся в почве при полном заполнении всех пор и пустот, за исключением занятых «защемленным» и адсорбированным воздухом.

**Капиллярная влагоемкость (КВ)** – количество влаги в почве, удерживаемое капиллярными силами в зоне капиллярной каймы грунтовых вод («капиллярно-подпертая влага»).

**Наименьшая влагоемкость (НВ)** – это установившаяся после стекания избытка воды влажность предварительно насыщенной почвы; достигается, как правило, через 2-3 дня после интенсивного дождя или полива хорошо дренируемой гомогенной почвы; **НВ** – это наибольшее количество влаги, которое почва в природном залегании может удержать в неподвижном или практически неподвижном состоянии после обильного или искусственного увлажнения и стекания влаги при глубоком залегании грунтовых вод («капиллярно-подвешенная влага»).

**Влажность разрыва капиллярной связи (ВРК)** – влажность почвы, при которой прерывается гидравлическая связь капиллярной сети и подвижность влаги в процессе иссушения резко уменьшается. Находится в интервале влажностей между наименьшей влагоемкостью и влажностью устойчивого завядания растений.

**Влажность завядания растений (ВЗ)** – влажность почвы, при которой влага становится недоступной для растений и они, теряя тургор, необратимо (даже при помещении в насыщенную парами воды атмосферу) завядают.

**Максимальная гигроскопическая влажность (МГ)** – влажность устанавливающаяся в почве при помещении ее в атмосферу с относительной влажностью воздуха 98%.

**Гигроскопическая влажность (ГВ)** – влажность почвы, соответствующая относительному давлению паров воды в лабораторных условиях. Соответствует влажности воздушно-сухой почвы.



Существует некоторое правило (далеко не всегда соблюдающееся!) о соотношении величин влажностей, соответствующих почвенно-гидрологическим константам. ПВ:НВ:ВРК:ВЗ:МГ=1:0.5:0.35:0.25:0.05. Но (очень важно!) это правило можно применять лишь для ориентации в величинах почвенно-гидрологических констант, но оно неприменимо для количественных расчетов. Основой для нахождения величин почвенно-гидрологических констант является их экспериментальное определение.

Таким образом, почвенно-гидрологические константы отражают характерные почвенно-гидрологические условия, связанные с определенными силами, удерживания воды в почве и ее подвижности и доступности для растений. Все это схематично изображено в табл. I.2.1:

Т а б л и ц а I.2.1

Формы воды и почвенно-гидрологические константы для всей области влажностей в почве

Абс.сух. почва	Гигр.	МГ	ВЗ	ВРК	НВ	КВ	Водовмestимость
<b>&gt; уменьшение степени связи воды с твердой фазой почвы &gt;</b>							
форма связи	прочносвязанная		рыхлосвяз.		слабосвязан.	несвязанная	
Подвижность	неподвижная		слабоподв.		подвижная	подвижная	свободная
Состояние	адсорбирован.		Пленочная		пленочно-капиллярная	капиллярная	гравитацион.
Механизм удерживания (физическая природа сил)	молекулярные (Ван-дер-Ваальса) химические электростатически		поверхностн., молекулярн.		капиллярно-сорбционные	капиллярные	гравитацион.
Природные объекты	тонкие поверхностные слои почвы полного физического иссушения		слои почвы от слабого до полного биологического иссушения		слой почвы после длительного (более двух сут.) свободного стекания	капилл. кайма над грунтовыми водами, горизонт с подпертой подвешенной влагой (при смене слоев по гранулометр. составу)	грунтовые воды почвенные верховодки и надмерзлотные верховодки

Если рассмотреть диапазоны между отдельными почвенно-гидрологическими константами, то принято выделять следующие категории:

(ПВ–НВ) – *диапазон подвижной влаги*. Указывает на количество воды, которое может стечь при наличии свободного стока из рассматриваемой почвенной толщи.

(ПВ–НВ) или (ПВ–динамическая влагоемкость) – *водоотдача*. Эта количественная характеристика, отражающая количество воды, вытекающее из почвенного слоя при понижении уровня грунтовых вод от верхней до нижней границы этого слоя (см. рис. V.7). Если уровень грунтовых вод опустился заметно ниже рассматриваемой почвенной толщи, то для расчета водоотдачи используют разницу между ПВ и НВ. Если же уровень остался в пределах рассматриваемой толщи, то между ПВ и динамической влагоемкостью, т.е. учитывают распределение влажности в капиллярной кайме грунтовых вод.

(НВ–ВЗ) – *диапазон доступной (продуктивной) влаги*. Для различных почв диапазон, указывающий на количество доступной для растений влаги, может быть различным, например, в песчаных почвах он может достигать 6–8%, а в суглинистых – 12–17%. Поэтому говорят, что суглинистые почвы содержат больше продуктивной влаги, чем

песчаные. Тяжелосуглинистые почвы будут содержать большее количество влаги, чем средне- и легкосуглинистые. А вот в глинах, и тем более в тяжелых глинах, доступной влаги может быть меньше, чем в средне- и тяжелосуглинистых почвах: в глинах стремительно возрастает количество связанной воды, больше увеличивается ВЗ, чем растёт НВ.

(НВ–ВРК) – *диапазон легкоподвижной*, легкодоступной для растений влаги. Это наиболее эффективная часть той продуктивной влаги, которая характеризуется диапазоном (НВ–ВЗ). Иногда это диапазон заменяют другим – (НВ–70%НВ). Этот диапазон влажности следует поддерживать в корнеобитаемом слое, чтобы с одной стороны избежать непродуктивных потерь влаги на стекание ее в нижележащие слои и в то же время способствовать наиболее эффективной работе фотосинтетического аппарата растений.

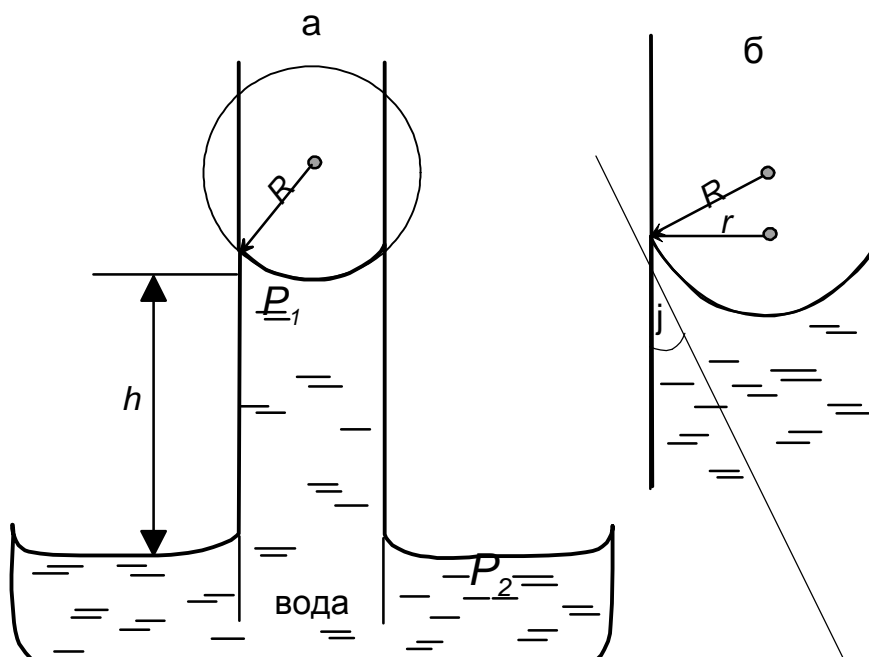
$W/HB$  – *относительная влажность*. Эта отношение предложено для того, чтобы сравнивать состояние влаги в различных по гранулометрическому составу почвах. Ведь сравнение по абсолютным величинам влажности ( $W$ ) мало о чем говорит: в глинистой почве влажность достигать 20%, а в песчаной, например, 10%. Но это не означает, что в глинистой почве влага более доступна и подвижна. Напротив, эта величина влажности близка к влажности завядания. В песчаной же – ближе к НВ. А вот если нормировать влажность величиной наименьшей влагоемкости, характерной для каждого почвенного слоя, то качественное сравнение производить можно. В приведенном примере, НВ для глинистой и песчаной почвы будут составлять, например, 35 и 12%. Тогда относительные влажности составят 57 и 83%, что говорит о значительно большей доступности и подвижности влаги в песчаной почве.

Характерные величины гидрологических констант для основных групп почв по гранулометрии можно найти в Приложении, в разделе «Справочные материалы» (табл.5 и 8 Приложения).

### **Давление почвенной влаги**

Влажность почвы, не может являться единственным показателем состояния влаги, даже если мы будем использовать гидрологические константы, более определенно характеризующие состояние почвенной влаги. Ведь даже с помощью относительной влажности мы можем лишь качественно указывать на доступность почвенной влаги и говорить о направлении перетока, но лишь гравитационной влаги (если относительная влажность будет больше 100%, то такой поток возможен). Необходима иная, количественная характеристика, указывающая на ее доступность для растений, направление потока почвенной влаги, позволяющая проводить расчеты передвижения влаги в почве и растениях. Эта характеристика, в отличие от влажности, должна быть потенциальной (т.е. представлять собой некий потенциал), аналогичной температуре при переносе тепла или давлению воздуха при движении воздушных масс.

Такой величиной оказалось давление почвенной влаги. Действительно, ведь почва – это капиллярно-пористое тело. А вода в капиллярах имеет иное, пониженное давление по сравнению со свободной чистой водой. Рассмотрим упрощенную схему почвенного капилляра (рис. 1.2.3) - простая стеклянная трубка, помещенная в чашку с водой. В нем поверхность образует мениск с кривизной радиусом  $R$ , вследствие чего под вогнутой поверхностью мениска формируется давление  $P_1$ , меньшее, чем под поверхностью свободной воды ( $P_2$ ).



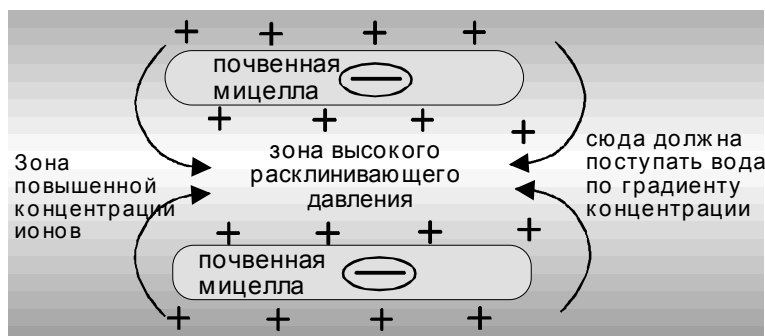
**Рис. I.2.3.** Схема подъема воды в стеклянном капилляре (а) и соотношение радиуса мениска и капилляра (б)

За счет разницы давлений и возникает подъемная сила в капилляре ( $P_2 - P_1$ ), которая связана с радиусами кривизны менисков уравнением Лапласа:

$$P_2 - P_1 = \frac{2s}{R} \text{ и радиусом капилляра - уравнением Жюрена: } P_2 - P_1 = \frac{2s \cdot \cos j}{r}. \text{ По-}$$

видимому, эту разницу, вызывающую подъем воды по капилляру удобнее всего использовать для характеристики степени связи почвенной влаги с поверхностью твердой фазы: чем больше будет значение, чем тоньше будет капилляр, тем выше поднимется вода в капилляре и выше будет степень связи почвенной влаги с твердой фазой. Вот эту разность давлений и принято называть капиллярным давлением, указывающим, насколько давление влаги в почвенном капилляре будет меньше давления влаги в свободной чистой воде, принятой за ноль. Как видно из приведенного уравнения Жюрена, капиллярное давление в не насыщенных влагой почва будет величиной отрицательной.

Однако не только менисковые силы могут понизить давление влаги в почве. В области пленочной влаги, в диапазоне от ВРК до (примерно) МГ, влага будет находится под действием расклинивающего давления тонких пленок. Схема образования этого давления приведена на рис. I.2.4.



**Рис. I.2.4.** Схема, поясняющая возникновение расклинивающего давления в почвах

Как видно из этой схемы, между отдельными частицами возникает зона повышенной концентрации ионов. Это приводит к повышенному осмотическому давлению, которое будет «сорбировать» свободную влагу между частицами, стремясь их раздвинуть, «расклинить». Эти силы также стремятся «набирать» в почву воду, они в целом действуют аналогично капиллярным. Поэтому их объединяют в одну величину давления влаги – в величину капиллярно-сорбционного или матричного давления влаги,  $P_{к-с}$ .

Не только сорбированные ионы и менисковые силы понижают давление влаги в почве. И свободные ионы, находящиеся в растворе вносят свою долю в понижение давления. Это осмотическая составляющая, которая зависит от концентрации (точнее, от активности) ионов в почве:  $P_{осм} = -RTC$ , где  $P_{осм}$  – осмотическое давление (в кПа),  $R$  – газовая постоянная, равная  $8.31 \cdot 10^3$  [кПа м<sup>3</sup>/К<sup>0</sup> моль],  $T$  – температура (в К),  $C$  – концентрация раствора в моль/м<sup>3</sup>. Нередко эту составляющую полного потенциала определяют по электропроводности почвенного раствора (ЕС):  $P_{осм} = -36 ЕС$ , электропроводность (ЕС) выражена в дСм/м.

Кроме того, вода находится под действием гравитационных сил, только за счет которых вода будет перемещаться вниз, в нижнюю часть почвенного профиля. За счет этих сил наблюдается равновесие воды в вышеприведенном схематическом почвенном капилляре, где они уравнивают менисковые. Эти гравитационные силы будут пропорциональны высоте воды в капилляре, и если выражать давление влаги в см водного столба, то это будут просто см. Размерность «см водного столба» вообще оказывается очень удобной для выражения всех указанных давлений и капиллярно-сорбционного, и осмотического и гравитационного. Но очень часто используют и другие. Поэтому приводим взаимосвязь основных (прежде всего, внесистемных, но часто используемых) размерностей давления влаги в почве:

$$1 \text{ атм} = 1030 \text{ см водного столба} = 750 \text{ мм ртутного столба} = 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$$

Таким образом, вода в почве, находясь под действием капиллярных и сорбционных, осмотических и гравитационных сил, понижает свое давление в сравнении со свободной чистой водой. Полное давление влаги в почве ( $P_t$ ), является алгебраической суммой всех указанных выше основных составляющих:

$$P_t = P_{к-с} + P_{гр} + P_{осм},$$

где  $P_t$  – полное, или суммарное давление влаги в почве,  $P_{к-с}$  – капиллярно-сорбционное (или матричное),  $P_{осм}$  – осмотическое давление влаги. Иногда еще к этой сумме давлений добавляют  $P_{вн}$  – давление вышележащих слоев, или другое внешнее давление, оказываемое на почву (сельскохозяйственной техники, колесного транспорта и пр.),  $P_{атм}$  – атмосферное давление. Однако в обычных условиях эти составляющие не учитывают.

#### Определения

**Давление почвенной влаги** – давление, возникающее в почвенной влаге за счет действия в почве сил различной природы, снижающих энергию почвенной воды по сравнению со свободной чистой водой при атмосферном давлении на уровне моря, энергия, которой принята за ноль. Полное давление влаги является алгебраической суммой составляющих: матричного или капиллярно-сорбционного, гравитационного, осмотического и др. Выделяют следующие составляющие полного давления влаги:

**Давление гравитационное** (синоним - гидростатическое) – давление, создаваемое массой столба воды и пропорциональное высоте последнего. В почвах и грунтах оно создается свободной гравитационной влагой (см. категории и состояния почвенной влаги), содержащейся в водоносном горизонте, а также столбом воды на поверхности почвы. Гравитационное давление – единственная составляющая в величине полного давления положительная.

**Давление капиллярно-сорбционное** (синоним - матричное, каркасное) – возникает за счет действия капиллярных и адсорбционных сил твердой фазы почвы, почвенной матрицы. По физической сути – это менисковое (капиллярное) и расклинивающее давление тонких пленок. В ненасыщенных влагой почвах – величина отрицательная.

**Давление осмотическое** – это давление, возникающее за счет растворенных веществ в почвенном растворе. Численно равно давлению  $\Pi$ , которое необходимо приложить к объему воды, тождественному по составу с почвенным раствором, для того, чтобы привести его в равновесие через полупроницаемую мембрану (проницаемую для воды, но непроницаемую для растворенных веществ) с объемом чистой воды. Величина отрицательная.

Итак, давление влаги отражает степень связи воды в почве, понижение давления в отношении давления свободной чистой воды (принятой за ноль). Поэтому величина давления позволяет производить оценку движения влаги из точки с большим давлением в точку с наиболее низким давлением влаги. Это относится не только к почве, но и другим капиллярно-пористым телам, в том числе и к растениям (см. Часть III). Методы определения давления влаги в почве можно найти в книгах А.М.Глобуса (1969), «Полевых и лабораторных методах определения ....» (2001) (см. Литературу).

#### Литература

- Г л о б у с А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеиздат, 1969.
- З а й д е л ь м а н Ф. Р. Изучение физических свойств почв на объектах осушения. М.: Ленгипроводхоз, 1988.
- З а й д е л ь м а н Ф. Р. Мелиорация почв. М.:Изд-во МГУ. 2004.
- Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств почв. Изд-во Моск.ун-та, 2001. Под ред. Е.В.Шеина
- Р о д е А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т.1. Л.: Гидрометеиздат. 1965.
- Р о д е А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т.2. Л.: Гидрометеиздат. 1989.
- Р о д е А. А. Почвенная влага. М.: Изд-во . АН СССР, 1952.
- С у д н и ц ы н И. И. Закономерности передвижения почвенной влаги. М.: Наука, 1964.

### Глава I.3. Движение воды и растворимых веществ в почве

В этой главе мы ознакомимся с движением воды и растворенных веществ в почве. Следует различать движение влаги в насыщенной влагой почве, когда все поровое пространство заполнено водой, и в не насыщенной водой почве, когда в поровом пространстве сосуществуют вода и воздух. Остановимся, прежде всего, на движении воды в насыщенной почве - на процессе фильтрации.

#### Фильтрация: движение воды в насыщенной влагой почве

Если все поровое пространство заполнено водой, то процесс движения влаги в такой двухфазной (только твердая и жидкая фазы) системе называют *фильтрацией*. При описании этого процесса считают, что по всем порам вода движется с одинаковой скоростью, формируя фильтрационный фронт в насыщенной водой почве. Такие условия в почве бывают нечасто и в основном характерны для движения грунтовых вод, верховодки, при весеннем снеготаянии. Именно фильтрация воды в почве является основой для понимания процессов движения воды в почве. Законом, описывающим движение в насыщенной почве, является закон Дарси.

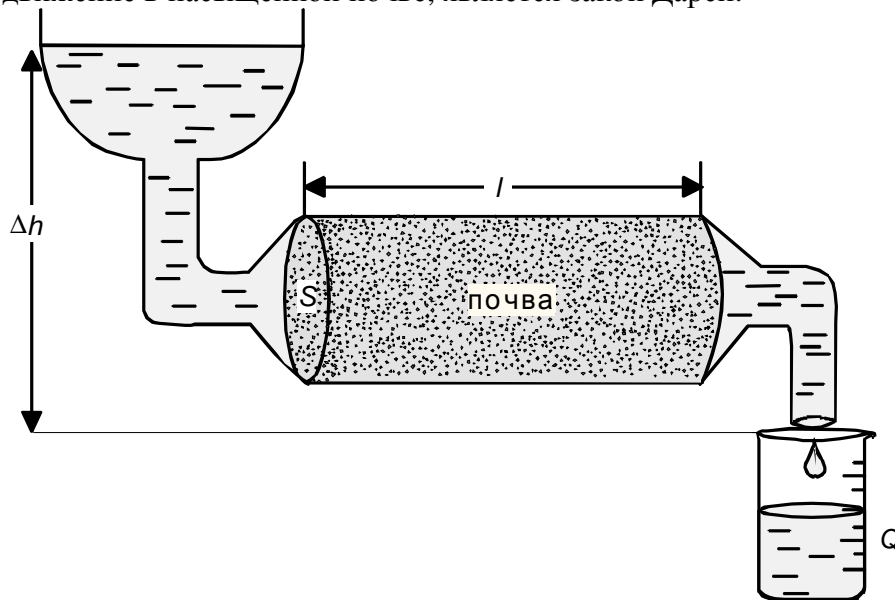


Рис. I.3.1. Схема движения влаги сквозь колонку почвы насыщенную влагой

Из этой схемы видно, что почвенная колонка, имеющая длину  $l$  и площадь поперечного сечения  $S$ , проводит воду с некоторой скоростью, характеризуемой *поток*ом влаги  $q_w$ . Этот поток равен количеству воды  $Q$ , прошедшему через сечение почвы  $S$  в единицу времени  $t$ :  $q_w = \frac{Q}{S \cdot t}$ . Он будет иметь размерность [см/сут, или м/сут], т.е.

[длина/время], так как величина  $Q$  имеет размерность объема,  $S$  – площади, их отношение – размерность длины. Эта размерность потока влаги физически представляет столб воды, выраженный в см (или в мм, или в м) водного слоя, который проходит через почву за единицу времени. Поэтому все потоки воды в почве представляются величиной слоя воды в единицу времени. Анри Дарси, измеряя расходы воды, параметры почвенных образцов, а также высоту перепада воды в подающем и приемном сосудах ( $h_1 - h_2 = \Delta h$ ), впервые заметил, что при фильтрации воды соблюдается следующее соотношение:

$$q_w = K_\phi \frac{\Delta h}{l},$$

где  $K_f$  – коэффициент фильтрации, а отношение  $\frac{\Delta h}{l}$  называется *гидравлическим градиентом*, т.е. отношением гидравлического напора  $\Delta h$  к длине колонки. Фактически гидравлический градиент – это потеря напора воды на единицу длины фильтрующей колонки.

Очень важно отметить, что  $K_f$  имеет ту же размерность, что и поток влаги, т.е. см/сут, м/сут и т.д., но лишь в том случае, если гидравлический градиент является величиной безразмерной, т.е. когда и перепад, и длина колонки выражены в одних и тех размерностях длины. Важно также, что коэффициент фильтрации равен потоку влаги при единичном градиенте. Поэтому нередко  $K_f$  называют скоростью фильтрации на единицу градиента. Кроме того (что тоже очень важно!),  $K_f$  является постоянной и характеристичной для данного почвенного объекта величиной. Он относится к фундаментальным, базовым почвенным свойствам. Классифицируют обычно эту величину следующим образом (табл. I.3.1):

Т а б л и ц а I.3.1.

Классификационные градации коэффициента фильтрации почв (по Ф.Р.Зайдельману, 1985)

Класс коэффициента фильтрации	Наименование	$K_f$ (см/сут)
I	Исключительно низкий (водоупор)	<1
II	Очень низкий (для почвенных горизонтов – водоупорный)	1–6
III	Низкий	6–15
IV	Средний	15–40
V	Высокий	40–100
VI	Очень высокий	100–250
VII	Исключительно высокий	>250

Приведенные в табл. I.3.1 градации коэффициента фильтрации – ориентировочные, в основном применимы для суглинистых почв. Песчаные почвы имеют обычно очень высокий коэффициент фильтрации, > 550 см/сут. И при высоких значениях  $K_f$  по (40–100 см/сут), по этой классификации, следует говорить о невысоких для песчаных почв коэффициентах фильтрации. В связи с этим ниже приведена добавочная таблица для различных по гранулометрическому составу почвенных объектов (табл. I.3.2).

Т а б л и ц а I.3.2

Диапазоны средних значений коэффициента фильтрации для различных по гранулометрическому составу почв

Почвенные объекты	Диапазон $K_f$ , см/сут
Песчаные почвы	300–800
Суглинистые	20–100
Глины	1–50

И в этом случае следует сделать несколько уточняющих дополнений. Во-первых, даже глинистая почва может иметь коэффициент фильтрации более 60 см/сут, так как она может быть хорошо оструктуренной, и эта структура – водостойчивой. Например, такие величины встречаются в черноземах на глинах, на карбонатных материнских породах, в ферраллитных почвах. Или напротив, песчаные почвы могут иметь очень низкий  $K_f$ , до нескольких десятков или даже единиц см/сут. Это случается тогда, когда песчаные почвы

слоисты, имеют прослойки более плотного (ожелезненного) песка или отличающиеся по гранулометрическому составу. В самом общем случае следует считать, что если почвенный горизонт имеет коэффициент фильтрации  $\leq 6$  см/сут, то этот почвенный горизонт можно рассматривать как водоупорный, практически непроницаемый для воды (табл. I.3.1) вне зависимости от его гранулометрического состава и других свойств.

Важно также отметить, коэффициент фильтрации – это свойство не только почвы, но и протекающей в почве жидкости, так как закон Дарси применим не только к воде, но и к другим жидкостям. И в этом случае поток этой жидкости ( $q_l$ ) будет определяться коэффициентом фильтрации жидкости ( $K_l$ ), плотностью ( $r_l$ ) и вязкостью ( $h_l$ ) этой жидкости:  $q_l = K_l \frac{r_l g}{h_l} \frac{\Delta h_l}{l}$ .

**Фильтрация** – движение жидкости в насыщенной этой жидкостью почве (двухфазной системе: твердая и жидкая фазы). В отсутствие специальных указаний фильтрация – это движение воды в насыщенной влагой почве

**Закон Дарси:** поток влаги ( $q_w$ ) в насыщенной почве пропорционален коэффициенту фильтрации ( $K_\phi$ ) и градиенту гидравлического напора  $\left(\frac{\Delta h}{l}\right)$ :  $q_w = K_\phi \frac{\Delta h}{l}$ , где гидравлический напор ( $Dh$ ) и длина колонки ( $l$ ) имеют одинаковые размерности длины; размерности  $K_\phi$  и  $q_w$  также одинаковы – [длина/время], например, м/сут, см/сут.

**Коэффициент фильтрации ( $K_\phi$ )** – это способность почвы проводить насыщенный поток влаги под действием градиента гидравлического давления. Обычно, при градиенте давления, близком к единице.

Приведенная запись уравнения Дарси свойственна для фильтрации влаги, когда линии тока направлены параллельно друг другу от поверхности почвы к её глубинным слоям. Однако могут быть случаи, когда влага течет по некоторому водосборнику по радиусу из окружающего почвенного пространства. Например, если в почве сделана вертикальная скважина, эта скважина углублена в грунтовые воды на величину  $H$ . Из окружающей почвы в скважину фильтруется влага. Вода в скважине, фильтруясь через почву в монолите, постепенно будет заполнять дрена. В каждый момент времени  $t$  можно регистрировать уровень воды в расположенной по оси монолита скважине: в начальный момент времени  $t_0$  уровень воды в скважине, измеряемый от верхнего уровня воды в сосуде, составит  $h_0$ , под действием этого гидравлического перепада  $h_0$  и движется вода в расположенную по оси скважину. В следующий момент времени  $t_1$  уровень воды в скважине уже будет  $h_1$ , в момент времени  $t_2$  –  $h_2$  и т.д. Обозначим высоту воды в скважине в момент времени  $t$  через  $h_t$ . И в любой момент времени мы можем найти отношение  $\frac{h_0}{h_t}$ .

Изменение этого отношения во времени и будет основным в определении  $K_\phi$ . Приведем формулу Эркина для расчета  $K_\phi$  по динамическим данным о  $\frac{h_0}{h_t}$ :

$$K_\phi = \frac{mr^2}{H + 2r} \cdot \frac{\lg \frac{h_0}{h_t}}{t},$$

где  $H$  – предельный напор воды (или в нашем случае, расстояние от уровня почвенных или грунтовых вод до дна скважины),  $r$  – радиус скважины-дрены,  $m$  – постоянная, зависящая от радиуса скважины, варьирует от 4 до 2.5, а для дрен с радиусом от 2.5 до 5 см принимается равной 3.5.



Если по динамическим данным о величине уровня воды в скважине-дрене построить график в координатах  $\lg \frac{h_0}{h_t}$  от  $t$ , то эта зависимость будет близка к линейной, угол наклона которой составит  $\alpha$ . Тангенс угла наклона будет характеризовать радиальный поток влаги. Тогда уравнение по расчету коэффициента фильтрации будет выглядеть следующим образом

$$K_{\phi} = \frac{mr^2}{H + 2r} \operatorname{tg} \alpha.$$

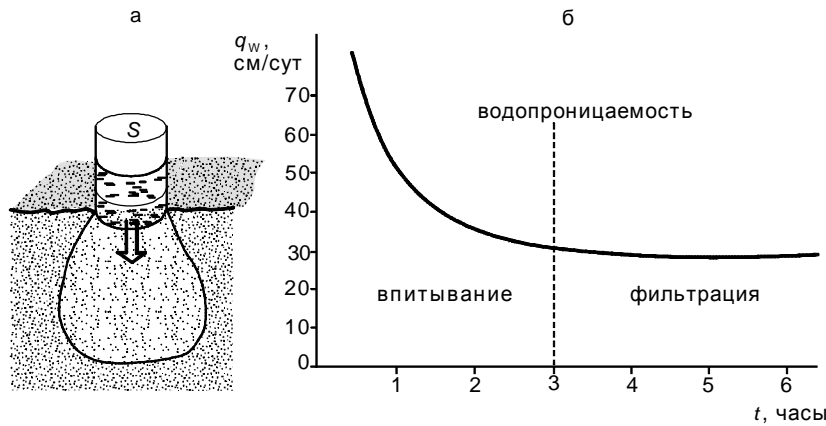
Как видно, при радиальном потоке формула расчета коэффициента фильтрации выглядит совсем иным образом, чем при традиционном, линейном потоке. Причем поток воды к дрене представлен в ней в неявном виде, а в виде  $\operatorname{tg} \alpha$ , характеризующего скорость подъема воды в скважине-дрене. Следует подчеркнуть, что закон Дарси как в радиальной, так и в линейной записи выполняется лишь для установившейся, ламинарной, безнапорной (или малонапорной) фильтрации.

В большинстве случаев вода попадает на поверхность почвы, которая достаточно иссушена. В этом случае, вода сначала впитывается в не насыщенную влагой почву, насыщает ее, и лишь после насыщения будет наблюдаться процесс фильтрации. Процесс же начального впитывания влаги в почву называют водопроницаемостью.

#### **Водопроницаемость. Впитывание (инфильтрация) воды в почву**

Проведем простой эксперимент. На поверхность почвы в естественных условиях установим и слегка углубим невысокий цилиндр, зальем его водой, и будем учитывать, какое количество воды впитывается в почву за определенные промежутки времени (рис. I.3.2, а). Сначала вода будет быстро поглощаться почвой, а затем поток воды стабилизируется (рис. I.3.2, б). Начальная стадия быстрого проникновения воды в ненасыщенную влагой почву при некотором гидравлическом напоре называется *впитыванием* или *инфильтрацией*. Затем, по мере насыщения всего порового пространства почвы водой поток стабилизируется. Наступает стадия движения воды в насыщенной почве – стадия фильтрации. Таким образом, процесс водопроницаемости включает в себя два процесса: впитывания воды в ненасыщенную влагой почву и, при заполнении всего порового пространства водой, – фильтрацию. Итак, впитывание – перемещение свободной воды в ненасыщенную влагой почву, – первая стадия водопроницаемости. Вторая стадия водопроницаемости – движение влаги вода в насыщенной влагой почве, – фильтрация. Но в любой момент времени мы можем рассчитать поток влаги в почву, как количество воды ( $Q$ , см<sup>3</sup>), прошедшее в почву в единицу времени ( $t$ , мин) через единицу площади экспериментального цилиндра ( $S$ , см<sup>2</sup>):

$q_w = \frac{Q}{S \cdot t}$  [см/мин]. Для соответствующих стадий этот поток будет равен коэффициенту впитывания ( $K_{впит}$ ) или коэффициенту фильтрации ( $K_{\phi}$ ), так как градиент гидравлического давления близок к единице. Оба они будут иметь ту же размерность, что и поток влаги  $q$ . Как правило, конечно,  $K_{впит}$  заметно больше  $K_{\phi}$ , что и видно на рис. I.3.2, б.



**Рис. I.3.2.** Цилиндр для определения водопроницаемости почвы (а) и изменение скорости водопроницаемости, отражающее 2 стадии процесса водопроницаемости – впитывание и фильтрацию (б)

Кроме того, при расчете  $K_{впит}$  следует указывать, в какой момент времени процесса водопроницаемости он был рассчитан. А вот  $K_f$  является стабильной, отражающей основные свойства почв величиной. Поэтому рекомендуется определять именно эту величину, именно величина  $K_f$  и используется во всевозможных гидрологических расчетах.

**Впитывание воды** [см/сут, м/сут, мм/час] – это начальная стадия водопроницаемости (инфильтрации) почвы. Поступление влаги в не насыщенную водой почву под влиянием градиентов сорбционных и капиллярных сил и гидравлического напора. Как правило, рассматривают впитывание воды с поверхности почвы. Характеризуют коэффициентом впитывания  $K_{впит}$  – аналогом коэффициента фильтрации  $K_f$  для начального периода движения воды в ненасыщенной почве, указывая, в какое время от начала эксперимента он определен.

**Водопроницаемость** – процесс поступления воды в почву при определенном напоре, который включает стадию впитывания (инфильтрации) – проникновения воды в ненасыщенную влагой почву и последующую стадию фильтрации – движение воды в насыщенной влагой почве.

**Инфильтрация** – синоним термина **впитывание**.

По коэффициенту впитывания различные почвы классифицируется следующим образом (табл. I.3.3.)

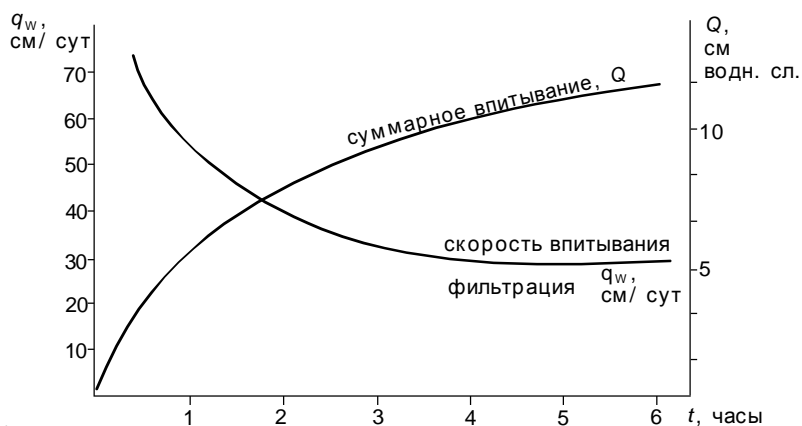
Т а б л и ц а I.3.3.

Классификации Н.А.Качинского по впитыванию (см/сут) для тяжело- и среднесуглинистых почв

Коэффициент впитывания (см/сут)	
< 70	Неудовлетворительная
70–150	Удовлетворительная
150–250	Хорошая
250–1000	Наилучшая
>1000	Излишне высокая

Различают суммарное (интегральное, кумулятивное) впитывание и скорость впитывания. Первое ( $Q$ , см водного слоя) - это кумулятивное количество впитываемой воды от начала эксперимента до определенного времени. Например, за первый час

эксперимента количество впитавшейся в почву воды составило 2.5 см, т.е. суммарное впитывание к этому времени достигло 2.5 см водного слоя; к концу второго часа впиталось уже 4 см, т.е. суммарное впитывание достигло 4 см водного слоя, и т.д. А скорость впитывания – это количество воды, проникающее через единицу площади в единицу времени [см/сут, мм/мин и пр.]. Например, скорость впитывания в первый час составила 2.5 см/час, а во второй – 2.0 см/час. На рис. I.3.3 представлены графики зависимости суммарного впитывания и скорости впитывания в течение эксперимента по изучению впитывания.

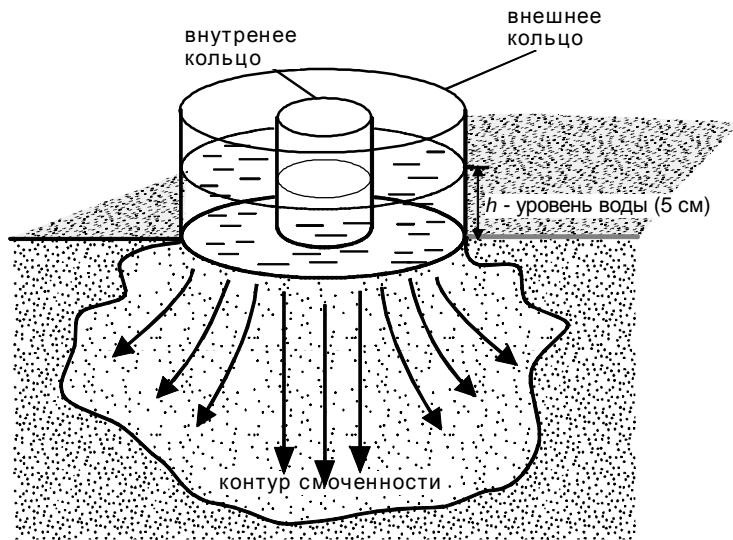


**Рис. I.3.3.** Изменение суммарного впитывания ( $Q$ ) и скорости впитывания ( $q_w$ ) в течение эксперимента

### Коэффициенты фильтрации и впитывания: экспериментальные определения и расчеты

В лабораторных условиях  $K_f$  и  $K_{впит}$  определяют на почвенных колонках или почвенных монолитах с помощью процедур, описанных выше и изображенных на рис. I.3.1. К этим же определениям, даже на образцах ненарушенного сложения, следует относиться с определенной долей осторожности. Все же трудно соблюсти все те условия, которые наблюдаются в поле: проявляются лабораторные эффекты, связанные с преимущественным движением воды около стенок монолита («пристенный эффект»), частичным разрушением структуры пор, с небольшими, а потому и непредставительными для почвы размерами и др. Поэтому, хотя лабораторные эксперименты по определению  $K_f$  важны, удобны, все же определение  $K_f$  в полевых условиях всегда предпочтительнее.

Обычно коэффициент фильтрации определяют с помощью метода малых заливаемых площадей, когда на поверхность почвы одна внутри другой устанавливают квадратные или круглые рамы площадью около 2500 (внешняя) и 625 см<sup>2</sup> (внутренняя). Эти две рамы нужны для того, чтобы гарантировать линейный поток, предотвратить боковое растекание воды при фильтрации. Действительно, как видно из рис. I.1.4, вода при проникновении в почву будет растекаться и в стороны от рамы, но только из внешней. Из внутренней рамы поток воды в почве будет линейным.



**Рис. I.3.4.** Определение коэффициента фильтрации методом малых заливаемых площадей (методом рам)

Именно поэтому внешнюю раму называют «защитной», а внутреннюю «измерительной» или «учетной». Поддерживая постоянный напор воды внутри обеих рам и измеряя расход воды во времени во внутренней раме, можно рассчитать коэффициент фильтрации для того периода времени, когда поток становится установившимся. На рис. I.1.3 изображена динамика потока воды из рамы во времени в виде динамики скорости впитывания при установке рамы на поверхность почвы при естественной влажности. На этой стадии можно рассчитать коэффициент впитывания –  $K_{enum}$ . В ходе эксперимента (обычно примерно через 3–4 часа) при поддержании постоянного напора на поверхности почвы, равного 5 см, поток стабилизируется, и начинается стадия фильтрации. Вот в этот период, строго фиксируя количество приливаемой воды ( $Q$ , мл) в единицу времени ( $t$ , мин) и зная площадь учетной внутренней рамы ( $S$ , см<sup>2</sup>), можно рассчитать и коэффициент фильтрации, учитывая, что градиент гидравлического давления близок к единице:

$K_{\phi} = \frac{Q}{S \cdot t}$ , выраженный в см/мин. В дальнейшем, его легко можно пересчитать в необходимые единицы [м/сут, см/сут и проч.]. В окончательном виде необходимо внести еще поправку на температуру воды, учитывая, что с изменением температуры вода изменяет свою вязкость. Все значения  $K_{\phi}$ , поэтому приводятся для температуры 10° по следующей формуле:

$$K_{\phi_{10}} = \frac{K_{\phi_T}}{0.7 + (0.03 \cdot T)},$$

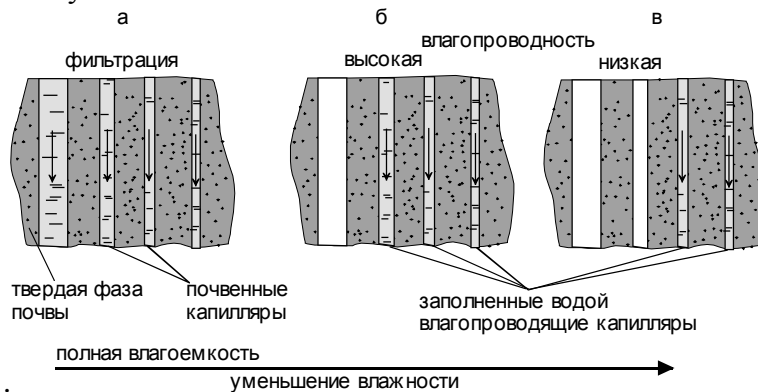
где  $K_{\phi_T}$  – это экспериментально определенный коэффициент фильтрации при температуре воды в эксперименте  $T$ , °С;  $K_{\phi_{10}}$  – приведенный к температуре 10°С коэффициент фильтрации.

Возможны также полевые определения  $K_{\phi}$  при близком залегании водонасыщенной толщи (грунтовые воды, верховодка), когда используются радиальные потоки воды в скважину. Для этого бурят скважину глубиной ниже уровня грунтовых вод, а затем следят за ее заполнением, фиксируя время и высоту воды в скважине. Принципы этого метода также нам известны, а расчеты ведут по формуле Эркина.

#### Движение воды в не насыщенной влагой почве

Закон Дарси используется для процесса фильтрации, когда движение осуществлялось по полностью заполненному водой поровому пространству. Если же лишь часть порового

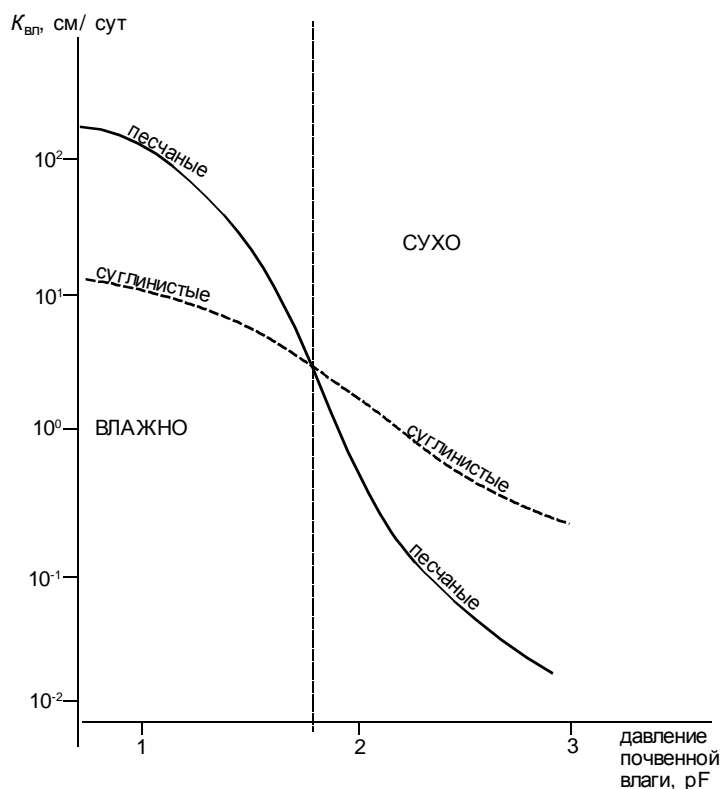
пространства проводит воду, а часть «опустошилась» и содержит газообразную фазу, пользоваться коэффициентом фильтрации уже нельзя. Следует использовать другое понятие водопроводимости почвы – *коэффициент влагопроводности* (или ненасыщенную гидравлическую проводимость). Коэффициент влагопроводности, хотя и имеет те же размерности, что и коэффициент фильтрации [см/сут, м/сут, мм/мин и пр.] и тоже характеризует способность почвы проводить поток влаги, не является величиной постоянной для данного почвенного объекта, а изменяется с изменением давления почвенной влаги. Прежде всего, с изменением капиллярно-сорбционной составляющей ( $P_{к-с}$ ). Поясним это положение на следующей схеме (рис. I.1.5). Используем опять-таки капиллярную модель почвы. Почва состоит из капилляров различного диаметра. В случае фильтрации влаги все капилляры заполнены и проводят воду (рис. I.1.5,а). Однако при некотором иссушении почвы в самые крупные капилляры уже входит воздух, и они не принимают участия в процессе движения воды (рис. I.1.5,б). Как говорят, снижается площадь водопроводящих путей, уменьшается способность почвы проводить поток влаги: проводимость становится заметно ниже, чем при фильтрации воды. Если почва продолжает иссушаться, и давление влаги еще больше снижается, то «опустошаются» и другие капилляры, вода остается только в самых тонких (рис. I.1.5, в). Теперь только они способны проводить воду, и проводимость, соответственно, еще больше уменьшается.



**Рис. I.3.5.** Влагопроводность почвы в насыщенном состоянии (фильтрация – а), и при понижении влажности (капиллярно-сорбционного давления влаги) и соответствующем «опустошении» капилляров (б, в).

Так как влагопроводность почвы уменьшается по мере снижения матричного давления влаги, то следует говорить уже о функции – функции влагопроводности.

**Функция влагопроводности** – это зависимость коэффициента влагопроводности (ненасыщенной гидравлической проводимости,  $K_{вл}$ ) от капиллярно-сорбционного ( $P_{к-с}$ ) давления почвенной влаги или от влажности почвы ( $\theta$ ):  $K_{вл} = f(P_{к-с}, \theta)$ . Нередко обозначают  $K_{вл}(P_{к-с})$  или  $K_{вл}(\theta)$ .



**Рис. I.1.6.** Функция влагопроводности – зависимость коэффициента влагопроводности ( $K_{вл}$ ) от капиллярно-сорбционного давления влаги ( $pF$ )

Вид функции влагопроводности весьма характерен (рис. I.1.6): способность почвы проводить поток влаги при уменьшении давления уменьшается на порядки. Так, при уменьшении давления от 0 до  $-1000$  см водного столба в суглинистых почвах коэффициент влагопроводности уменьшается на 2–3 порядка, от 50–100 до 0.05–0.1 см/сут. Это совершенно определенно указывает на то, что сухая почва будет проводить воду значительно хуже, чем влажная.

Закон Дарси отражал зависимость между гидравлическим градиентом и коэффициентом фильтрации. В случае движения влаги в ненасыщенной почве ситуация заметно изменяется: гидравлический напор уже отсутствует, так как ни на поверхности почвы, ни в ней самой нет свободной воды, и движение происходит не по всему заполненному водой поровому пространству, а лишь по части капиллярных пор. Все это и приводит к двум существенным модификациям закона Дарси.

Если в классическом законе Дарси для фильтрации воды в почве используется градиент гидравлического напора, то в не насыщенной влагой почве движение происходит уже под действием давления почвенной влаги. Причем влага будет перетекать от точки с большим давлением в точку с меньшим. Вспомним, что в ненасыщенных почвах давление – величина отрицательная, и, следовательно, движение воды будет происходить по направлению к самому низкому давлению влаги в рассматриваемом почвенном пространстве. Итак, первое отличие – использование величины давления почвенной влаги.

В случае не насыщенной влагой почвы, как уже указывалось выше, следует использовать коэффициент влагопроводности или (синоним) коэффициент ненасыщенной гидравлической проводимости.

В не насыщенной водой почве следует учитывать знаки величин давления влаги, запись уравнения производить в общем виде с учетом знака, а за положительное направление потока влаги в почве принимать восходящее, к поверхности почвы.

**Модифицированный закон Дарси** – закон, описывающий движение воды в не насыщенную влагой почву, которое происходит под действием градиента давления почвенной влаги, а коэффициентом пропорциональности является коэффициент влагопроводности.

**Модифицированный закон Дарси** гласит: поток влаги в ненасыщенной почве пропорционален градиенту давления влаги и коэффициенту влагопроводности, соответствующему величине давления влаги.

Из этих определений следует несколько важных выводов и их следствий.

*Первый.* Для описания переноса влаги надо использовать градиент давления влаги, т.е.  $\frac{dP}{dz}$  в случае вертикального передвижения воды. Мы уже знаем, что давление влаги имеет ряд составляющих: капиллярно-сорбционное (матричное) давление, гравитационное, осмотическое и др.. Какие же составляющие учитывать при переносе воды? Необходимо учитывать две: капиллярно-сорбционную ( $P_{\kappa-c}$ ) и гравитационную ( $P_{zp}$ ) составляющие. Осмотическое давление ( $P_{осм}$ ), как правило, не учитывают, так как, во-первых, возникающие перепады концентраций солей достаточно быстро исчезают за счет диффузии и процессов движения воды. А во-вторых - в естественных почвах они если и имеются, то весьма небольшие. Могут составлять исключение некоторые почвенные объекты, в виде пухлых солончаков, или условий, когда в почву попадают некоторые гигроскопические соли - но это специальные случаи. В реальных условиях в естественных почвах учитывают  $P_{\kappa-c}$  и  $P_{zp}$ , точнее, их градиент  $\frac{d(P_{\kappa-c} + P_{zp})}{dz}$ .

*Второй.* Для каждого момента расчета потока следует использовать значение коэффициента влагопроводности, находить которое следует из функции влагопроводности для давления влаги, к которому направлен поток, т.е. использовать наименьшее из двух рассматриваемых при расчете градиента давлений влаги. Это нередко подчеркивают, записывая  $K_{вл}(P)$ .

И, наконец, *третье* важное замечание: о знаках в модифицированном уравнении Дарси. В зависимости от направления поток будет иметь тот или иной знак. За положительный выбран поток влаги вверх, к дневной поверхности. Вверх вода может перемещаться только под действием перепада капиллярно-сорбционного давления, причем при меньшем значении вверх. И поэтому при расчетах потока вверх из большего значения вычитают меньшее и получают положительное значение перепада капиллярно-сорбционного давления. В то же время гравитационное давление всегда движет воду вниз. Причем перепад гравитационного давления на расстоянии  $z$  равен этому расстоянию. Поэтому при выражении гравитационного давления в тех же единицах, что расстояние, градиент гравитационного давления равен единице, т.е.  $\frac{dP_{zp}}{dz} = 1$ . И в этом случае модифицированное уравнение Дарси можно записать:

$$q_w = K_{вл}(P_{\kappa-c}) \cdot \left( \frac{dP_{\kappa-c}}{dz} - 1 \right)$$

Учитывая, что поток влаги есть изменение объемной влажности  $\partial q$  за период времени  $\partial t$ , в случае одномерного вертикального потока это уравнение записывают либо в векторном виде, либо в обычной форме

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{вл}(P_{\kappa-c}) \cdot \frac{P_{\kappa-c} - z}{z} \right]$$

Модифицированное уравнение Дарси используют при расчетах движения влаги в почвенном профиле. Это уравнение является основой математических моделей переноса влаги и растворимых веществ в почве. Необходимо подчеркнуть, что движение ионов в

почве имеет свои особенности и механизмы: ионы в процессе движения с потоком почвенной влаги могут сорбироваться или, напротив, десорбироваться почвой, могут попадать в так называемые «застойные» зоны, двигаться и за счет градиентов концентрации. Все эти процессы характеризуются соответствующими физическими параметрами.

### Движение растворимых веществ в почве

Ион будет двигаться совместно с потоком почвенной влаги. Этот тип переноса называют *конвекционным*. Отметим также, что поток растворенного вещества ( $q_c$ ) будет пропорционален его концентрации в движущемся растворе ( $c$ ) и потоку раствора по рассматриваемому капилляру:  $q_c = q_w \cdot c = v \cdot c$ , где  $q_w$  или  $v$  – поток раствора через единичный капилляр, т.е. массовый поток (в случае почвы – массовый поток воды,  $q_w$ , рассчитываемый по уравнению Дарси), отнесенный к порозности ( $e$ ):  $n = q_w / e$ . Если теперь записать уравнение с использованием потока раствора. Это уравнение называется *уравнением неразрывности*, оно будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = v \cdot \frac{\partial c}{\partial z}$$
 – уравнение переноса растворимого вещества с конвективным потоком почвенной влаги.

**Уравнение неразрывности** связывает изменение концентрации растворимого вещества во времени со скоростью потока раствора в условном единичном капилляре, определяемой по уравнению Дарси, и изменение концентрации на границах рассматриваемого слоя

$$\frac{\partial c}{\partial t} = v \frac{\partial c}{\partial z}$$

Уравнение описывает конвективный перенос растворимых веществ совместно с движущейся почвенной влагой.

Другим механизмом, обеспечивающим движение иона в почве является диффузионный. *Диффузия* – процесс перемещения ионов по градиенту концентрации: ион всегда будет двигаться из точки с большей концентрации в точку с меньшей, за счет диффузии происходит выравнивание концентраций.

Для описания процесса диффузии в растворах используют, как правило, *второй закон Фика*, гласящий, что поток вещества (т.е. его изменение концентрации во времени) будет пропорционален второй производной изменения концентрации по расстоянию и коэффициенту молекулярной диффузии  $D_m$  [см<sup>2</sup>/сут, м<sup>2</sup>/с и др.]:

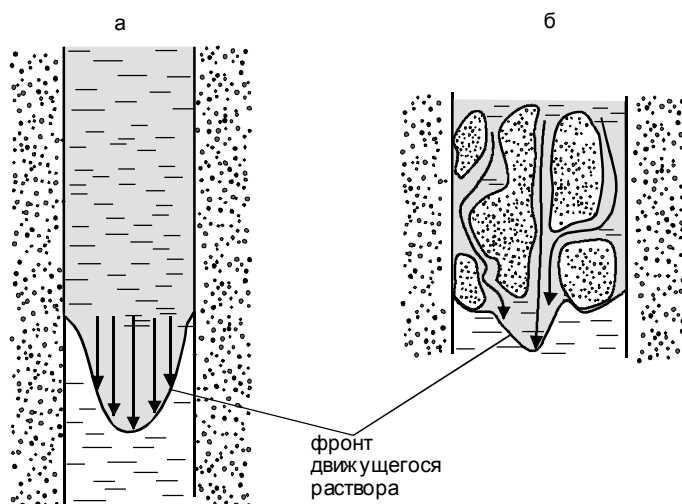
$$q_c^d = -D_m \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}.$$

Поэтому суммарный перенос растворенных веществ уже будет включать два процесса: диффузию и конвекцию. Результирующее уравнение переноса будет выглядеть следующим образом:

$$q_c = -D_m \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + v \frac{\partial c}{\partial z}.$$

Данное уравнение более полно описывает перенос веществ в фильтрующем капилляре. Однако при движении растворенного вещества в поровом пространстве почв возникает и еще ряд эффектов, связанных с особенностями порового пространства почв. Если почвенный раствор течет по поровому пространству, то движение ионов в этой поре будет различным (рис. I.1.7, а).





**Рис. I.1.7.** Схема формирования «размытого» фронта движения раствора в тонком почвенном капилляре (а) и в pore неравномерного диаметра (б)

Естественно, около стенок капилляра вода более связана, имеет несколько иную структуру и поэтому менее подвижна. В центре скорость переноса больше. Оказывается, что в таком тонком капилляре сформируется неравномерный фронт движущегося раствора, который скажется и на дополнительной диффузности фронта передвигающегося в песчаной колонке раствора. Следует учитывать также, что поровое пространство неравномерно по диаметру. Могут возникать условия, подобные рис. I.1.7 (б), когда отдельные струйки движущегося раствора будут иметь различную скорость. Это приведет к еще большему «размытию», диффузности фронта движущегося раствора. Явление, причина которого заключена в возникновении отдельных смешивающих «струек» в движущемся в почвенных порах растворе, получило название *«гидродинамической дисперсии»*. «Гидродинамической» – потому что оно связано с движением раствора, с его гидродинамикой. «Дисперсией» – так как его результат в целом аналогичен проявлению диффузии, это явление также приводит к диффузности фронта движущегося раствора. Поэтому и характеризовать это явление можно коэффициентом, аналогичным коэффициенту диффузии, – коэффициентом гидродинамической дисперсии,  $D_h$ .

Таким образом, при движении растворенных веществ в пористых средах, таких, как почва, наблюдаются следующие явления:

- нет четкой границы между поступающим раствором и почвенной влагой, происходит «размыв» фронта движущегося раствора;
- при движении происходит непрерывное перемешивание раствора и почвенной влаги, в результате образуется расширяющаяся зона дисперсии (зона смешивания, переходная зона, шаг смешения);
- интенсивность изменения концентрации индикатора больше в направлении движения потока по сравнению с направлением, перпендикулярным движению;
- явление перемешивания, или «размыва», фронта движущегося раствора тем сильнее, чем выше скорость потока и значительнее дифференциация размеров пор.

Отметим также, что если мы проводим опыт с почвенным образцом, а не в «идеальном капилляре», то молекулярный коэффициент диффузии,  $D_m$ , уже использовать нельзя. Движение ионов происходит уже не в растворах, а в извилистом поровом пространстве почв, заполненном раствором. Поэтому используют понятие *«эффективного коэффициента диффузии»*,  $D_{эфф}$ , учитывающего извилистость порового пространства почв и влажность почвы. В результате эти два коэффициента, отражающих процессы диффузии и гидродинамической дисперсии, объединяют в один коэффициент, называемый *коэффициентом конвективной диффузии*,  $D^*$ :

$$D^* = D_{эфф} + D_h,$$

Уравнение переноса растворимых веществ будет выглядеть следующим образом:

$$q_c = -D^* \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial z},$$

С учетом того, что перенос веществ осуществляется через поровое пространство, заполненное водой, необходимо ввести в уравнение и объемную влажность почвы ( $q$ ):

$$q \frac{\partial c}{\partial t} = -D^* \cdot q \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial z}.$$

Кроме того, в процессе движения веществ могут происходить процессы, связанные с его выпадением в осадок, потреблением растениями и др. – процессы его расхода, стока. Либо, напротив, его количество может увеличиваться за счет растворения осадков, притока сбоку и пр. – процессы притока, источника. Они обозначаются как  $\pm J(z, t)$ , – член, характеризующий возникновение (+) или потребление (–) мигранта, или, как иногда говорят, «источник/сток». Он будет характеризоваться изменением концентрации во времени и иметь ту же размерность [моль/см<sup>3</sup>·сут]. Если же происходит сорбция вещества, то в уравнение переноса мигранта следует ввести концентрацию вещества в адсорбированной фазе ( $S$ , [моль/г]). Или, учитывая, что все процессы, в том числе и сорбции, происходят в объеме почвы [моль/см<sup>3</sup>], она будет характеризоваться величиной  $S \cdot r_b$ , где  $r_b$  – плотность почвы [г/см<sup>3</sup>]. В итоге мы получим уравнение, которое будет описывать все отмеченные явления передвижения растворимых веществ в почве. Оно носит название уравнения конвективно-диффузионного переноса и выглядит следующим образом:

$$q \cdot \frac{\partial (r_b S + c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D^* \cdot q \frac{\partial c}{\partial z} - v \cdot c \right] \pm J(z, t)$$

Как и положено, проверим соответствие размерностей этого уравнения, используя традиционные для физики почв величины:

$$\frac{\frac{\text{см}^3}{\text{см}^3} \cdot \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot \frac{\text{моль}}{\text{г}} + \frac{\text{моль}}{\text{см}^3}}{\text{сут}} = \frac{1}{\text{см}} \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{сут}} \cdot \frac{\text{моль}}{\text{см}^3} \right] \pm \frac{\text{моль}}{\text{см}^3 \text{сут}}.$$

В уравнении соблюдается правило размерностей.

Отметим, – все приведенные уравнения, и механизмы переноса ионов в почве будут использованы нами и при оценке движения ионов к корню и в растении. Это общие законы и соответствующие параметры переноса веществ в капиллярно-пористых телах. Именно поэтому они столь распространены в агрофизике.

**Гидродинамическая дисперсия** – это «размыв» фронта движущегося раствора, диффузия, происходящая вследствие неравномерности, сложности порового пространства почв. Характеризуется коэффициентом гидродинамической дисперсии  $D_h$ .

**Эффективная диффузия** – диффузия, происходящая в заполненном почвенной влагой поровом пространстве почв. Отличается от молекулярной диффузии в растворах вследствие извилистости порового пространства и реальной влажности почв и характеризуется коэффициентом эффективной диффузии  $D_{эфф}$ .

Коэффициент гидродинамической дисперсии,  $D_h$ , и коэффициент эффективной диффузии,  $D_{эфф}$ , объединяются в один – **коэффициент гидродинамической диффузии,  $D^*$** , вследствие того, что оба эти процесса (гидродинамическая дисперсия и эффективная диффузия) приводят к совместному результату («размыву» фронта движущегося раствора) – экспериментально регистрируемому постепенному увеличению концентрации раствора, вытекающего из почвенной колонки, при

единовременном введении концентрированного раствора на поверхность фильтрующей колонки.

**Конвективно-диффузионное уравнение** переноса растворимых веществ описывает изменение концентрации вещества во времени в конкретной точке почвы с помощью коэффициента гидродинамической диффузии, скорости потока почвенной влаги, явления сорбции вещества и его появление или исчезновение в рассматриваемой точке, вследствие явлений растворения твердого осадка этого вещества, его потребления корнями растений и других явлений, вызывающих его дополнительное образование или расход в рассматриваемой точке почвы.

#### Литература:

- З а й д е л ь м а н Ф. Р. Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Л., Гидрометеиздат. 1985.
- З а й д е л ь м а н Ф. Р. Мелиорация почв. М.:Изд-во МГУ. 2004.
- К а ц Д. М., Ш е с т а к о в В. М. Мелиоративная гидрогеология. М.:Изд-во МГУ. 1981.
- Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств почв. Изд-во Моск.ун-та, 2001. Под ред. Е.В.Шеина.
- С у д н и ц ы н И. И. Передвижение почвенной влаги и влагопотребление растений. М.: Изд. Моск.ун-та, 1979.
- Х э н к с Р. Д ж., Д ж. Л. А ш к р о ф т. Прикладная физика почв. Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 151 с.
- Ш е и н Е. В., В. А. К а п и н о с. Сборник задач по физике почв. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1994.

## Глава I.4. Теплофизические свойства почв

Ранее мы указывали, что для роста и развития растений самыми важными среди физических факторов окружающей среды оказываются вода, воздух, солнечная энергия и тепло. В том числе почвенное тепло, температура почвы. В связи с важностью физических свойств почв почвы в отношении формирования температуры почвенного слоя подробно остановимся на основных механизмах и теплофизических свойствах почв.

### Перенос тепла в почве. Основные механизмы

Поток тепла в почве описывается законом Фурье, который связывает поток с градиентом температуры через коэффициент пропорциональности – теплопроводность,  $\lambda_T$ :

$$q_T = -\lambda_T \frac{dT}{dz},$$

где  $q_T$  – поток тепла в почве [кал/см<sup>2</sup>·сут],  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности [кал/см·С<sup>0</sup>·сут],  $\frac{dT}{dz}$  – градиент температуры [С<sup>0</sup>/см]. Здесь следует отметить, что, как и в

случае с уравнением Дарси, описывающим поток влаги в почве, речь идет об установившемся, стационарном потоке тепла в почве. Только для этих условий справедливо уравнение Фурье. Основным теплофизическим свойством, как видно из этого уравнения, является параметр теплопроводности – коэффициент теплопроводности.

Явление теплопроводности имеет несколько внутренних механизмов.

*Кондукция* – перенос тепла при непосредственном контакте частиц друг с другом. Так как почвенные частицы практически всегда контактируют друг с другом, этот механизм преобладает во всех минеральных почвах.

*Перенос «скрытой теплоты»* (теплопароперенос) – перенос тепла совместно с парами воды, образующимися (с потерей тепла) в одной точке почвы и конденсирующимися (с выделением тепла) в другой. Выражение «скрытая теплота» связано с термином «скрытая теплота парообразования», которая составляет 585 кал/г. Если в почве имеется градиент температуры, то пары воды движутся от точки с большей температурой в точку с меньшей. Поэтому если в теплой части почвенной поры (см. рис. I.4.1) испарится 1 г воды, то в этой части почва охладится на 585 кал. Этот грамм парообразной воды, конденсируясь в холодной части, выделит те же 585 кал. За счет этого переноса тепла с парами воды также достигается температурное равенство.



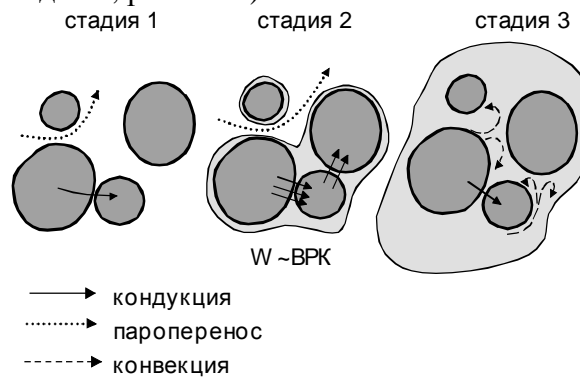
Рис. I.4.1. Перенос скрытой теплоты – теплопароперенос

*Конвекция* – прогревание за счет струйчатого перемешивания жидкой и газообразной фаз. В почвах проявление этого механизма заметно лишь при высокой влажности, быстром перемешивании свободной воды.

Перенос тепла за счет прямого *инфракрасного излучения*. В почвах он представлен в малой степени.

Если в почве представлено несколько механизмов переноса тепла то, возможно, что при изменении ее влажности эти механизмы по-разному будут формировать теплопроводность почвы в целом. Первоначально, в сухой почве, частицы свободно лежат

друг относительно друга (рис. I.4.2, стадия 1). И теплоперенос будет обусловлен лишь отдельными немногочисленными контактами (кондукция). По мере образования водной пленки, частицы приближаются друг к другу. Увеличивается число контактов, хотя свободное поровое пространство еще значительно, и водные «пробки», заполненные водой капилляры, не препятствуют термопаропереносу (стадия 2). В данный момент представлены в полной мере два основных механизма паропереноса. Теплопроводность достигает максимальных значений. Это происходит в момент достижения почвой влажности, близкой к ВРК. При дальнейшем увеличении влажности теплопроводность будет возрастать уже слабо, в основном за счет механизма конвекции, свободной циркуляции жидкости (стадия 3, рис. I.4.2).



**Рис. I.4.2.** Схема теплопереноса при различной влажности почвы

Поэтому и зависимость коэффициента теплопроводности от влажности носит характер, близкий к экспоненциальному, когда после значений влажности, близких к ВРК, кривая выполаживается, приближаясь к максимальным значениям.

**Закон Фурье** – количество тепла, переносимого через единицу площади в единицу времени ( $q_T$ , кал/см<sup>2</sup>·сут) прямо пропорционально теплопроводности почвы ( $\lambda_T$ , кал/см °С·сут) и градиенту температуры ( $\frac{dT}{dz}$ , °С/см):

$$q_T = -\lambda_T \frac{dT}{dz}$$

**Коэффициент теплопроводности**,  $\lambda_T$  [кал/см °С сут или Дж/с·м·°С = Вт/м·К] равен количеству тепла (в кал или Дж), прошедшего в единицу времени (сут или секунду) через единичное сечение почвы (см<sup>2</sup> или м<sup>2</sup>) при единичной толщине слоя почвы (1 см или 1 м) и при разнице температур в 1 °С (или 1 К).

#### **Теплофизические почвенные параметры: теплоемкость, температуропроводность**

Если мы интересуемся прогреванием почвы, т.е. увеличением температуры отдельного ее слоя со временем, нам необходимо знать не только теплопроводность, но и количество тепла, необходимого для нагревания одного грамма (или см<sup>3</sup>) почвы на один градус. А это уже следующее теплофизическое свойство – теплоемкость.

Теплоемкость единицы массы тела называют удельной теплоемкостью и обозначают  $C_m$ , [кал/г·град]; теплоемкость единицы объема называют объемной теплоемкостью и обозначают  $C_v$ , [кал/см<sup>3</sup>·град]. Соответственно, объемная теплоемкость численно равна количеству тепла, необходимого для нагревания одного см<sup>3</sup> почвы на 1°С; удельная – количеству тепла, необходимому для нагревания одного г почвы на 1°С. Вполне понятно, что объемная и удельная теплоемкости будут связаны соотношением

$$C_v = C_m \cdot r_b,$$

где  $r_b$  – плотность почвы.

Теплоемкость – величина аддитивная, т.е. теплоемкость почвы складывается из теплоемкостей составляющих ее почвенных фаз. Физически это вполне понятно – тепло равномерно будет распределяться в трехфазной почвенной системе по всем ее фазам, нагревая их в соответствии с теплоемкостью каждой из фаз и ее долей в почве. Если мы обозначим объемные доли твердой фазы, воды и воздуха через  $f_s$ ,  $f_w$ ,  $f_a$ , то в сумме они составят 1. Каждая из фаз имеет соответствующую объемную теплоемкость: твердая фаза,  $C_{vs}$ , в среднем –  $0.48 \text{ кал/см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ , вода,  $C_{vw}$ , – 1, а воздух,  $C_{va}$ , – всего лишь  $0.003 \text{ кал/см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ . А теплоемкость почвы в целом составит уже

$$C_v = f_s C_{vs} + f_w C_{vw} + f_a C_{va}.$$

Хорошо известно, что твердая фаза в почве состоит из минеральной и органической части. Отметим, что объемная теплоемкость органических веществ в 1.25 раза выше, чем минеральных. В большинстве минеральных почв органическая компонента не превышает  $0.05\text{--}0.10 \text{ см}^3/\text{см}^3$  (или около 2.0–4.2 % в традиционном выражении в виде процентов органического вещества к абсолютно сухому весу). Поэтому при расчетах почвенной теплоемкости не требуется разделять органическую и минеральную компоненты, взяв значение доминирующей минеральной –  $0.48 \text{ кал/см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ . А вот в органогенных почвах, торфах органическая компонента может значительно превалировать над минеральной. И с различием их теплоемкостей надо считаться. Для этого вводят еще объемные доли минеральной части  $f_m$  и органической  $f_{org}$ , которые в сумме составляют объемную долю твердой фазы почвы  $f_s$ . Отметим также, что теплоемкость воздуха несравненно низка по сравнению с другими компонентами, и этой составляющей теплоемкости почвы также нередко пренебрегают. Следовательно, уравнение теплоемкости почвы будет иметь следующий вид:

$$C_v = 0.48 f_m + 0.6 f_{org} + f_w.$$

Этим уравнением и можно пользоваться для расчета теплоемкости почвы и при различной влажности, и при изменении содержания органического вещества. Надо только помнить, что оно справедливо для объемной теплоемкости, когда все компоненты представлены в объемных долях  $[\text{см}^3/\text{см}^3]$ , а теплоемкости – в  $[\text{кал/см}^3 \cdot ^\circ\text{C}]$ . Из уравнения следует и то, что теплоемкость почвы будет линейно повышаться с увеличением влажности. Это выражается в линейной зависимости объемной теплоемкости от удельной теплоемкости сухой почвы ( $C_m$ ) и влажности ( $W$ ):

$$C_v = \left( C_m + \frac{W}{100} \right) \cdot r_b,$$

которая, подчеркнем, справедлива в данном виде для системы СГС.

Линейно теплоемкость будет увеличиваться и с увеличением плотности почвы, что опять-таки видно из приведенного выше уравнения. Как следствие, уплотненные почвы будут иметь повышенную теплоемкость, т.е. для их прогрева потребуется большее количество тепла.

**Теплоемкость** – это количество тепла, которое необходимо затратить, чтобы увеличить температуру почвы на  $1^\circ\text{C}$ . Теплоемкость единицы массы тела называют удельной теплоемкостью и обозначают  $C_m$ ; теплоемкость единицы объема называют объемной теплоемкостью и обозначают  $C_v$ .

**Объемная теплоемкость** ( $C_v$ ,  $\text{кал/см}^3 \cdot \text{град}$ ) численно равна количеству тепла, необходимому для нагревания одного  $\text{см}^3$  почвы на  $1^\circ\text{C}$ ;

**Удельная теплоемкость** ( $C_m$ ,  $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ ) – количество тепла, необходимое для нагревания одного г почвы на  $1^\circ\text{C}$ :  $C_v = C_m \cdot r_b$

Теплоемкость почвы складывается из теплоемкостей составляющих ее почвенных фаз в соответствии с их объемной долей:  $C_v = f_s C_{vs} + f_w C_{vw} + f_a C_{va}$

В большинстве случаев нас интересует, как быстро прогревается почва, как растет (или уменьшается) температура ее слоев. В конечном счете, для всей напочвенной и внутрипочвенной биоты наиболее важно, какова температура почвы, как изменяется температура почвы со временем  $\frac{\partial T}{\partial t}$ . Динамика температуры, как и динамика солей, будет определяться градиентом температуры по расстоянию:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{I_T}{C_m \cdot r_b} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}.$$

Появился новый коэффициент, состоящий из известных нам параметров  $\frac{I_T}{C_m \cdot r_b}$ , который называют температуропроводностью  $k$  [см<sup>2</sup>/сут]. Он отражает способность почвы проводить температурную волну. Заметим, что размерность температуропроводности [см<sup>2</sup>/сут, см<sup>2</sup>/с] совпадает с коэффициентом диффузии для солей. Поэтому нередко величину  $k$  называют термодиффузивностью. Понятно, что чем выше температуропроводность почвы, тем она быстрее будет проводить температурный поток, будет быстрее повышаться температура нижних слоев, быстрее проникать вниз «температурная волна». То есть почва будет быстрее прогреваться.

**Основное уравнение теплопереноса** – уравнение, связывающие изменения температуры во времени с изменением температуры по расстоянию. Для динамики температуры это уравнение имеет вид

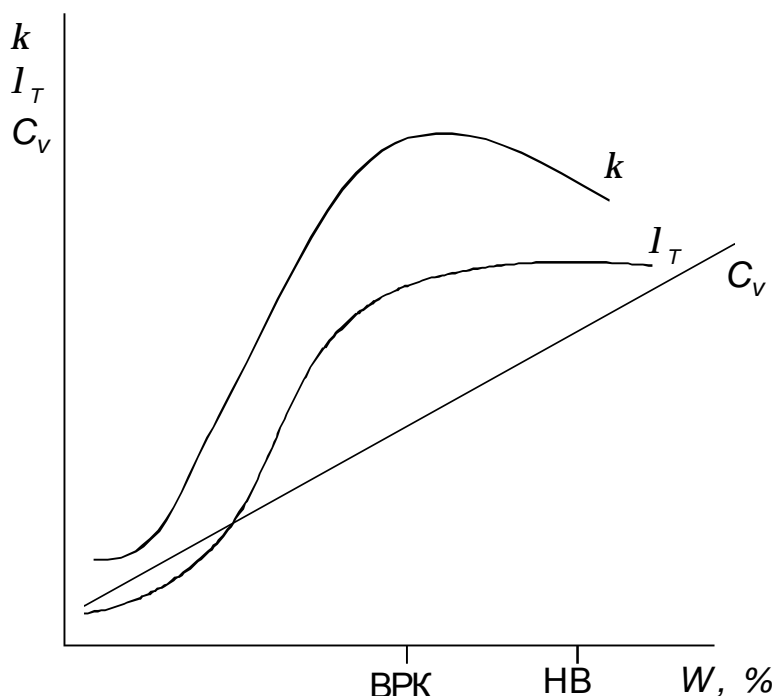
$\frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$  – основное уравнение теплопереноса, связывающее изменение температуры почвы ( $\partial T$ ) во времени ( $\partial t$ ) с изменением температуры по расстоянию в направлении градиента (в приведенном написании – по вертикали ( $\partial z$ )) через коэффициент температуропроводности,  $k$ , [см<sup>2</sup>/сут, см<sup>2</sup>/с].

Основные уравнения переноса (воды, солей, тепла) получают подстановкой в уравнение неразрывности основных уравнений переноса веществ и тепла. Для динамики влажности в почве – это уравнение Ричардса, для динамики растворенных веществ – это конвективно-диффузионное уравнение.

**Коэффициент температуропроводности** ( $k$ , см<sup>2</sup>/с, см<sup>2</sup>/сут) – характеризует способность среды выравнивать свою температуру, которая определяется не только теплопроводностью среды, но и ее объемной теплоемкостью. Коэффициент температуропроводности является производной теплофизической характеристикой. Он численно равен повышению температуры, которое произойдет в единице объема почвы при поступлении в нее тепла, численно равного ее теплопроводности:  $k = \frac{I_T}{C_v}$ .

Коэффициент температуропроводности имеет размерность см<sup>2</sup>/с – такую же, как коэффициент диффузии. В зарубежной литературе по физике почв его называют термодиффузивностью, или коэффициентом термодиффузии.

Температуропроводность почвы, так же, как и теплопроводность, существенно зависит от ее влажности. Характер этих зависимостей определяется взаимодействием твердой, жидкой и газообразной фаз почвы (рис. I.4.3).



**Рис. I.4.3.** Зависимости теплофизических параметров от влажности

На рис. I.4.3 представлены зависимости теплофизических параметров от влажности почвы. На этом графике можно выделить три характерные области, соответствующие различным энергетическим состояниям почвенной влаги. В области низких влажностей вода прочно связана, и процессы теплообмена определяются исключительно кондуктивным механизмом переноса тепла в почве. С увеличением влажности возрастает площадь стыковых манжет и, соответственно, величина кондуктивной теплопроводности. Одновременно увеличивается и объемная теплоемкость, линейно зависящая от влажности. Рост теплопроводности компенсируется ростом теплоемкости, и частное от деления этих величин — температуропроводность — практически не зависит от влажности. С дальнейшим повышением влажности линейный рост температуропроводности продолжается. Это диапазон пленочной влаги. Пародиффузионный перенос достигает своего максимума: теплопроводность возрастает быстрее, чем объемная теплоемкость. В результате температуропроводность увеличивается с влажностью. При дальнейшем повышении влажности появляется капиллярная влага, заполняющая почвенные капилляры, пародиффузионный перенос тепла ослабляется. Теплообмен сводится к кондуктивной теплопередаче и к слабо выраженной в почве конвекции. В результате, как отмечали выше, рост теплопроводности замедляется. Поскольку объемная теплоемкость продолжает увеличиваться с влажностью, температуропроводность начинает снижаться (рис. I.4.3). Температуропроводность достигает максимума в области влажностей близких к ВРК, когда в наибольшей мере выражен контакт частиц за счет пленочной влаги, что способствует кондукционному переносу тепла; при этом наблюдается и пародиффузионный механизм.

Основные значения теплофизических параметров и приведены в табл. I.4.1.

Отметим, что глинистая почва без гумуса при одинаковой влажности с песчаной имеет одинаковую с ней теплоемкость. И это вполне понятно — теплоемкость кварца и усредненная теплоемкость почвенных минералов близки (около  $0.48 \text{ кал/см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ), теплоемкость же воды —  $1 \text{ кал/см}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ . Но температуропроводность песчаной почвы при одинаковой с глинистой влажности заметно выше — при одинаковых влажностях песчаная проводит тепло значительно быстрее. Кроме того, следует учитывать, что влажность песчаных почв практически всегда ниже за счет быстрого стекания влаги. Получается, что песчаные почвы и суше, и температуропроводность ее твердофазной части намного выше.



Это означает, что песчаные почвы будут значительно быстрее прогреваться. Поэтому их и называют «теплыми», в отличие от «холодных» глинистых, тяжелых почв. Легкие почвы быстрее прогреваются весной, теплее летом, впрочем, и осенью быстрее отдают тепло, быстрее охлаждаются. Таким образом, можно сказать, что песчаные почвы имеют более контрастный тепловой режим.

Т а б л и ц а 1.4.1

Теплофизические свойства основных почвенных компонентов и почв

Природный объект	Теплопроводность , $\lambda_T$ , мкал/см·с·°C	Теплоемкость объемная, $C_v$ , кал/см <sup>3</sup> ·°C	Температуро проводность, $\kappa$ , см <sup>2</sup> /с
Кварц	21	0.48	0.0438
Минералы	7	0.48	0.0140
Органические вещества	0.6	0.6	0.0010
Вода	1.37	1.0	0.0014
Лед	5.2	0.45	0.0116
Воздух	0.06	0.003	0.02

Теплофизические свойства почв при различной порозности и влажности

Почва	Порозность , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	Влажн ость объемн ая, см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	Теплопр оводнос ть, $\lambda_T$ , мкал/см· с·°C	Теплоемк ость объемная, $C_v$ , кал/см <sup>3</sup> · °C	Температуро проводность, $\kappa$ , см <sup>2</sup> /с
Песчаная почва	0.4	0.0	0.7	0.288	0.0024
	0.4	0.2	4.2	0.488	0.0086
	0.4	0.4	5.2	0.688	0.0076
Глинистая почва	0.4	0.0	0.6	0.288	0.0021
	0.4	0.2	2.8	0.488	0.0057
	0.4	0.4	3.8	0.688	0.0055
Торф	0.8	0.0	0.14	0.12	0.0012
	0.8	0.4	0.7	0.52	0.0013
	0.8	0.8	1.2	0.92	0.0013

#### Литература

- Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств почв. Изд-во Моск.ун-та, 2001. Под ред. Е.В.Шеина
- П о п о в А. И., Р о з е н б а у м Г. Э., Т у м е л ь Н. В. Криолитология. М., 1985.
- Р е в у т И. Б. Физика почв. Изд-во «Колос», 1972. 368 с.
- Ш у л ь г и н А. М. Температурный режим почвы. Л., 1957. 242 с.

## Часть II. Физика приземного слоя атмосферы (микроклиматология)

### Введение

Эта часть посвящена физике атмосферных явлений, происходящих в непосредственной близости от растительного покрова, в самом растительном покрове и почве. Это явления поступления, преобразования лучистой энергии Солнца в тепло, нагревание растений и почвенных слоев, - явления радиационного и теплового балансов деятельной поверхности. Здесь же рассматриваются явления испарения и транспирации растений, которые связаны с поступающей лучистой энергией. Это очень важный момент при изучении данного раздела, - взаимосвязь теплового и водного балансов почвы и растительного покрова. Он формирует принцип, на котором построены многие физически обоснованные модели расчета испарения, и, соответственно, управления тепловыми и водными ресурсами.

Агрофизический аспект изучения физических явлений в приземном слое атмосферы связан прежде всего с подходами к оценке водных и тепловых ресурсов для формирования урожая, биологической продуктивности почв, для продукционного процесса. Растение, находящееся на границе почвы и атмосферы, использующее почвенные и космические ресурсы, оказывается сложным, разнообразным и очень «чутким» преобразователем: почвенной влаги в атмосферную, солнечной энергии в тепло, и в конечном счете, лучистой энергии Солнца, запасов углерода в атмосфере (в виде  $\text{CO}_2$ ) и почвенных веществ (питательных и воды) в биомассу. Поэтому в данном разделе особое внимание мы уделим прежде всего радиационным, тепловым и водным преобразованиям на уровне растительного слоя.

В данном разделе мы внедряемся в область метеорологии и климатологии. Однако, учитывая, что наша основная агрофизическая задача связана с лишь с физическими процессами в приземном слое атмосферы, нередко эту область агрофизической науки, вслед за Р. Слейтером и И.Макилроем называют «микроклиматологией». Микроклиматологией – потому что масштаб рассмотрения явлений связан с приземным слоем атмосферы и ограничен пространством сельскохозяйственного поля или даже еще меньшей площадью. Хотя термин «микроклиматология» и не является общепринятым, а тем более официальным, мы будем его придерживаться для того, чтобы постоянно иметь в виду уровень и масштаб задач, изучаемых в данном разделе агрофизики.

Данная глава состоит из следующих частей:

1. Радиационный и тепловой баланс деятельной поверхности. ФАР
2. Основные агрометеорологические характеристики
3. Температура почвы и ее значение для растений

## Глава II.1. Радиационный и тепловой режимы

### Виды радиации. Радиационный баланс

Поток лучистой энергии – это количество лучистой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади. Единицы измерения – Вт/м<sup>2</sup>, кал/см<sup>2</sup> мин, Дж/см<sup>2</sup> ч и проч. Область метеорологии, изучающей потоки лучистой энергии, называется *актинометрия*.

В актинометрии различают несколько видов радиации, или составляющих радиационного баланса. Прежде всего – *прямая солнечная радиация*,  $I_s$  (рис. II.1.1). Это коротковолновая (400–750 нм – ультрафиолетовая и видимая области) радиация, идущая прямо и непосредственно от нашего светила. В основном именно эта радиация и формирует климат: чем ближе угол падения солнечных лучей к нулевому (угол падения лучей измеряют, как угол между лучом и нормалью к поверхности почвы), тем жарче будет климат. И само слово «климат» происходит от греческого слова, обозначающего «угол», в данном случае, падения солнечных лучей. Это следует и из основного уравнения расчета прямой солнечной радиации по углу падения солнечных лучей, точнее, по высоте Солнца ( $h_\square$ ):

$$S' = S \sin h_\square,$$

где  $S'$  – солнечная энергия, поступающая на горизонтальную поверхность,  $S$  – прямая солнечная радиация при параллельных солнечных лучах.

Прямая солнечная радиация в июле при ясном небе в Москве в астрономический полдень (соответствует 13.30 по московскому времени) составляет около 700 Вт/м<sup>2</sup>. Суммарная радиация в этой же зоне может достигать 1500 Вт/м<sup>2</sup>, среднедекадные величины колеблются от 250 до 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

Другая составляющая – это *рассеянная (диффузная) радиация*,  $I_a$ , радиация, отраженная от взвешенных коллоидальных и других частиц, молекул газов, от облаков в атмосфере, окружающих предметов. Если же солнце закрыто облаками, то вся поступающая радиация – рассеянная. По законам рассеивания, в частности по закону Релея, спектральный состав рассеянной радиации отличается от прямой. Закон Релея гласит, что рассеивание лучей обратно пропорционально 4-й степени длины волны:

$$S_l = \frac{32p^3(m-1)^2}{3n\lambda^4},$$

где  $S\lambda$  – коэффициент рассеивания,  $m$  – коэффициент преломления в газе,  $n$  – число молекул в единице объема,  $\lambda$  – длина волны. В связи с этим законом рассеянная радиация содержит относительно большее количество коротковолновых лучей, чем прямая солнечная радиация.

Прямая и рассеянная формируют *суммарную солнечную радиацию* –  $I_\Sigma$ .

Для изучения продукционного процесса, для агрофизических целей важно, что часть прямой и отраженной радиации участвует в процессах фотосинтеза растений. Поэтому ее и называют фотосинтетически активной радиацией – ФАР. Эта радиация попадает в диапазон для волн от 380 до 710 нм. На эту радиацию приходится около 50% всей солнечной радиации, достигающей деятельной поверхности. Отметим также, что всего лишь 1–3% от ФАР накапливается в виде продуктов фотосинтеза и только в очень редких случаях (тропические леса, плантации сахарного тростника и др.) эта величина приближается к 5%, а в искусственных условиях к 8%. Подробнее об этой важной величине – чуть ниже.

И еще одна составляющая, приходящая на деятельную поверхность. Это так называемое *противоизлучение атмосферы*,  $I_{\Pi}$ , формирующееся в результате нагрева частиц в атмосфере. Она представлена длинноволновым излучением (длина волны более

750 нм) и образуется, когда нагретые частицы и газы в атмосфере выделяют в окружающее пространство тепловое, инфракрасное излучение. Эта радиация излучается окружающими растения предметами, в том числе и самими растениями. Физика этого явления говорит о том, что чем выше температура тела, тем больше оно будет излучать, причем по степенному закону. В отношении радиации, это закон Стефана-Больцмана:  $\Psi = dK^4$ , где  $\Psi$  – эмиссии абсолютно черного тела, а  $K$  – температура по Кельвину (т.е.  $T+273.16$ ), а  $d$  – константа Стефана-Больмана ( $5.67 \cdot 10^{-8}$ , ватт/м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>). Но для природных поверхностей в это уравнение добавляется еще один параметр, указывающий на то, что природные тела несколько отличаются от теоретического абсолютно-черного тела, а потому и называются физиками “серыми” излучателями. Добавляется еще параметр излучаемости,  $e$ :  $\Psi = edK^4$ . Для листьев растений он составляет 0.94-0.99, да и для других природных тел отличается от этих величин не слишком значительно.

Таким образом, на деятельную поверхность поступает радиация в виде  $I_s + I_a + I_{li}$ , причем в большинстве случаев поступающая коротковолновая  $(I_s + I_a)_{поступ.}$  и. длинноволновая составляющие вполне сравнимы по величинам.

Часть поступающей радиации отражается от деятельной поверхности в виде коротковолновой  $(I_s + I_a)_{отраж.}$ , а часть в виде длинноволновой, которая формирует излучение деятельной поверхности, почвы,  $I_{le}$ . Это уже растительное сообщество или оголенная почва постоянно выделяет в околопочвенное пространство инфракрасное излучение, тепловые лучи. Тогда радиационный баланс в дневное время будет представлен следующим уравнением:

$$I_n = [(I_s + I_a)_{поступ.} - (I_s + I_a)_{отраж.}] + (I_{li} - I_{le})$$

Первый член (в квадратных скобках) представляет собой энергию, сформированную за счет коротковолновой радиации, а второй член – за счет длинноволновой. Оба эти вида радиации участвуют в нагревании почвы. Особо следует сказать о величине излучения деятельной поверхности, почвы,  $I_{le}$ . Мы нередко считаем, что это весеннее солнце прогревает приземный слой воздуха, принося первое тепло. Однако основное значение здесь имеет именно излучение почвы. Весенние солнечные лучи нагревают поверхность почвы, она, в свою очередь, приземный слой воздуха за счет именно излучения деятельной поверхности. Рождается теплый поток воздуха, - тот самый теплый ласковый весенний ветерок. И можно сказать, что это именно почва приносит нам весеннее тепло.

Нередко используют понятие «альбедо» ( $\alpha$ , величина безразмерная) как отношение отраженной к поступившей коротковолновой энергии, характеризующее состояние деятельной поверхности:

$$\alpha = \frac{(I_s + I_a)_{отраж.}}{(I_s + I_a)_{поступ.}}$$

Так, для свежего снега  $\alpha$  составляет 0.8–0.85, для сухой почвы – 0.15–0.35, а для влажной – 0.05–0.014. Естественно, чем ниже  $\alpha$ , тем большее количество радиационной энергии преобразуется и поступает в почву. Так что, если мы хотим направить в почву дополнительный поток энергии, надо стремиться уменьшить  $\alpha$  деятельной поверхности. Чаще всего это достигается покрытием поверхности темными пленками, черными материалами (торфом, сажой и пр.).

Следует отметить, что величина альбедо зависит не только от цвета поверхности, но от ее шероховатости и от угла падения солнечных лучей:  $\alpha = V^{(c \cdot \sin b + 1)}$ , где  $z$  – коэффициент цветности, который колеблется от 0.13 для водной поверхности до 0.27–0.37 для растительности,  $c$  – коэффициент шероховатости; изменяется для тех же объектов от 0.3 до 0.43–1.3,  $b$  – угол падения солнечных лучей.

В случае использования величины  $\alpha$ , уравнение радиационного баланса выглядит так:

$$I_n = \underbrace{(I_s + I_a) \cdot (1 - \alpha)}_{\text{поступившая-отраженная Коротковолновая}} + \underbrace{(I_{li} - I_{le})}_{\text{поступившая-излученная Длинноволновая}}$$

Этот радиационный баланс для дневного времени, когда светит солнце. В ночные же часы он составит, естественно, лишь разницу длинноволновых радиаций:

$$I_n = I_{li} - I_{le}$$

#### Определения

**Прямая солнечная радиация,  $I_s$**  – это коротковолновая (400–750 нм: ультрафиолетовая и видимая области) радиация, идущая непосредственно от Солнца.

**Рассеянная радиация,  $I_a$**  – также коротковолновая радиация, отраженная от взвешенных коллоидальных и других частиц, от газов и паров воды в атмосфере и вследствие этого изменившая свой спектральный состав: в сравнении с прямой радиацией спектр рассеянной смещается в коротковолновую область, при почти полном отсутствии длинноволновой, инфракрасной частей спектра..

Прямая и рассеянная формируют **суммарную солнечную радиацию** -  $I_{\Sigma}$ .

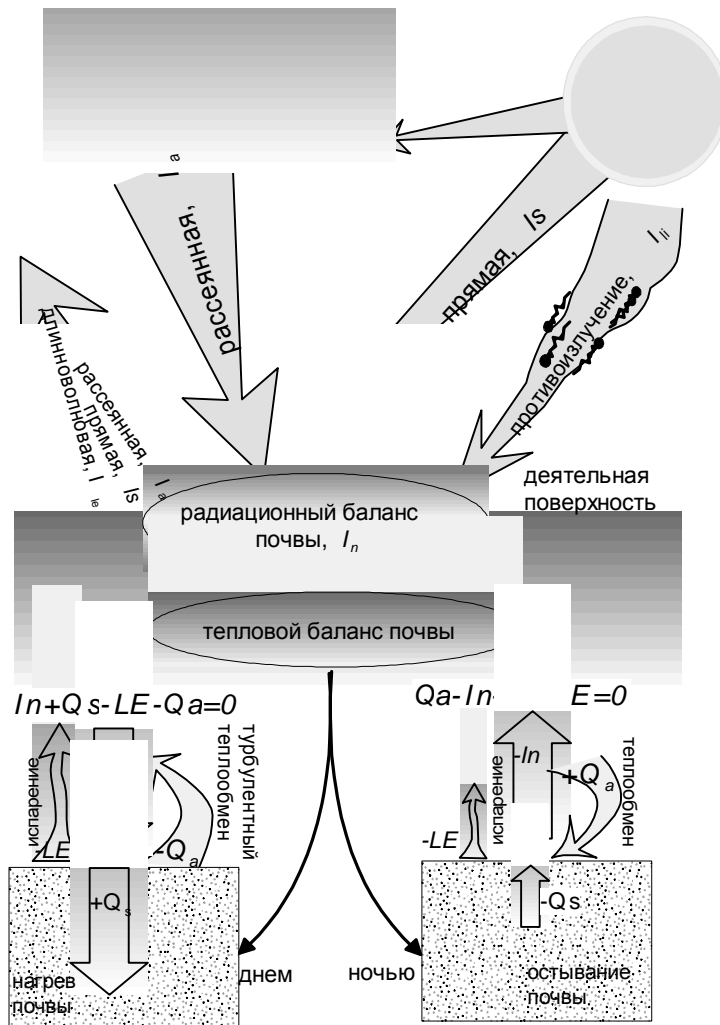
**ФАР (фотосинтетически активная радиация)** – часть коротковолновой радиации (от 380 до 710 нм), наиболее активная в отношении фотосинтеза и продукционного процесса растений. Представлена как прямой, так и рассеянной радиацией.

**Противоизлучение атмосферы,  $I_{li}$** , - длинноволновое излучение (длина волны более 750 нм), формирующееся в результате нагрева взвешенных частиц и газов в атмосфере и выделение ими в окружающее пространство теплового, инфракрасного излучения.

**Отраженная и излучаемая** растительным покровом или оголенной почвой радиации – это отраженная коротковолновая  $(I_s + I_a)_{\text{отраж.}}$  и тепловая длинноволновая (инфракрасная),  $I_{le}$  радиации.

#### Тепловой баланс

Итак, взаимосвязанные процессы поступления радиационной энергии в виде прямой, рассеянной и отраженной радиаций, ее последующее превращение в тепловую на деятельной поверхности, расходуемую на нагревание почвы (и растений), приземного слоя воздуха и эвапотранспирацию – вот основные процессы радиационного и теплового балансов на земной поверхности. Все эти процессы представлены на рис.П.1.1.



**Рис. П.1.1.** Схема радиационного и теплового балансов деятельной поверхности

Прямая, отраженная в видимом спектре, и длинноволновая радиации (инфракрасные) поступают на деятельную поверхность, а от деятельной поверхности излучается радиация в виде отраженной в видимом спектре и в виде тепловых лучей (инфракрасных). Результатом всех этих отражений-преобразований является *радиационный баланс*,  $I_n$  – большая стрелка, направленная либо внутрь (день), либо из почвы в атмосферу (ночь). Формируется *тепловой баланс почвы*. Как мы уже знаем, баланс формируется для конкретного слоя и промежутка времени. Положительные составляющие баланса – это все составляющие, имеющие направление к рассматриваемому слою, стремящиеся его «наполнить», отрицательные – напротив, его «опустошающие». В самом общем виде тепловой баланс будет выглядеть следующим образом

$$(Прямая\ солнечная\ радиация) + (Рассеянная\ солнечная\ радиация) + (Противои兹лучение\ атмосферы) - (Отраженная\ солнечная\ радиация) - (Излучение\ почвой\ тепла) - (Конвективный\ нагрев\ приземного\ слоя\ атмосферы) - (Потери\ тепла\ на\ испарение\ и\ транспирацию) - (Поток\ тепла\ в\ почву) = 0$$

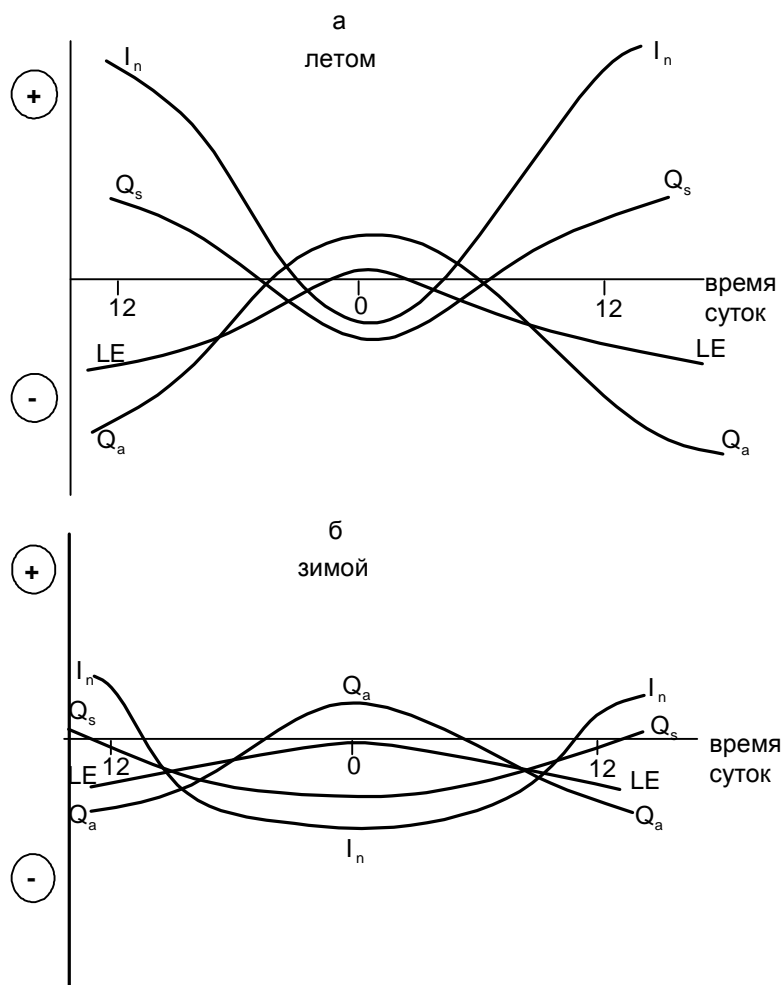
Первые 5 членов этого расписанного баланса, как мы уже знаем, формируют радиационный баланс –  $I_n$ . А 3 последних расходные: нагревание почвы (листовой поверхности растений) –  $Q_s$ , нагревание приземного слоя воздуха –  $Q_a$  и испарение воды –  $LE$ , как произведение удельной теплоты испарения  $L$  (которая составляет примерно 585 кал/г  $H_2O$ ) на количество испарившейся воды из почвы и из растений –

эвапотранспирацию,  $E$  (г  $\text{H}_2\text{O}/\text{см}^2\cdot\text{сут}$ ). Поэтому размерности всех составляющих теплового баланса те же, что и радиационного баланса –  $\text{кал}/\text{см}^2\cdot\text{сут}$ . Не забудем и еще одну составляющую – энергия, пошедшая на фотосинтетические процессы –  $Q_{\text{ФАР}}$ , впрочем, как мы уже отмечали, весьма маленькую в сравнении с остальными. Поэтому нередко ее даже не указывают (впоследствии, мы также не будем указывать) в уравнениях теплового баланса.

$$I_n - Q_s - Q_a - LE - Q_{\text{ФАР}} = 0$$

В этих уравнениях направление потоков тепла и, соответственно, знак указывается в зависимости от направления к поверхности: положительными будут все составляющие, имеющие направление к поверхности, а отрицательными – от нее. Это и учтено в вышеприведенном уравнении теплового баланса. Оно характеризует дневные часы. А вот в ночные часы, как это видно на рис.П.1.1, составляющие имеют другое направление. Из глубины почвы к поверхности направлен внутрипочвенный поток. И величина  $Q_s$  положительна, так же, как и  $Q_a$ , так как турбулентный поток тепла может быть направлен в ночное время к поверхности почвы. Эвапотранспирация в ночное время близка к нулю, а почва выделяет тепло в атмосферу – радиационный баланс отрицателен. Таким образом, тепловой баланс в ночное время составит:

$$Q_s + Q_a - I_n - LE = 0$$



**Рис. П.1.2.** Суточный ход составляющих теплового баланса в летний и зимний периоды.

Это означает, что и радиационный баланс в ночное время отрицателен. Поэтому дважды в сутки основные составляющие теплового баланса ( $I_n$ ,  $Q_s$ ,  $Q_a$ ) меняют свой знак и

проходят через ноль. Тепловой баланс имеет периодический (но не симметричный) вид, как это и изображено на рис. П.1.2. Суточный ход радиации суммарной радиации рассчитывают на основании высоты Солнца ( $h_0$ ), и некоторых коэффициентов по уравнению Берлянд:

$$I_{\Sigma} = \frac{S_0 \sin h_0}{1 + f \operatorname{cosec} h_0},$$

где  $S_0$  – солнечная постоянная, принимая равной  $1.98 \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$ ,  $f$  – коэффициент, величина которого определяется географической широтой и временем года; обычно, в течение года он изменяется от 0.06-0.07 в январе-декабре, до 0.20-0.23 – мае-августе месяцах.

Различаются суточный баланс и для летнего и зимнего периодов: для летнего периода (рис. П.1.2, а) суточный радиационный баланс положителен большую часть суток, а вот зимой (рис. П.1.2, б) – в основном отрицателен. Это хорошо видно на рис. П.1.2: зимой более длительный период отрицательных значений  $I_n$ ,  $Q_s$ . В результате почва остывает.

Что следует из представленной схемы и уравнений радиационного и теплового балансов? Прежде всего, что все эти процессы формируются на деятельной поверхности, и от ее характеристик зависят величины составляющих баланса. Изменяя их (например, величину альбедо  $\alpha$ ), мы можем существенно изменить соотношение стрелок поступающей и отраженной энергий, и в результате, величину потока тепла, поступающего в почву. А это значит что, изменяя свойства деятельной поверхности можно весьма заметно изменить соотношение составляющих теплового баланса. Это особенно важно, – именно поверхности почвы или растительного покрова принадлежит основная роль в прогреве приземного, жизненно важного слоя воздуха.

Следует отметить, что в указанном уравнении теплового баланса имеется член, отражающий испарение или эвапотранспирацию –  $LE$ . Это позволяет совместно рассматривать два вида баланса – тепловой и водный, которые оказываются тесно взаимосвязанными. Это чрезвычайно важно, так как позволяет по тепловым ресурсам рассчитывать потери воды с поверхности растительного покрова, которые и определяют влагообеспеченность полей и в конечном итоге, их продуктивность. Две важнейших составляющих продукционного процесса, – тепло и влага, являются взаимообусловленными, что предоставляет определенные возможности для управления водными и тепловыми ресурсами. Этим свойством теплового баланса мы еще воспользуемся при определении испарения из составляющих теплового баланса.

Кроме того, весьма важным является тот факт, что в уравнении теплового баланса член турбулентного потока тепла может быть положительным не только в ночное время, когда этот поток направлен в почву. Такое направление турбулентного потока может сложиться вследствие так называемого явления «оазисного эффекта». В условиях малой влажности и высокой температуры воздуха и при достаточном количестве влаги в почве эвапотранспирация может быть столь значительной, что поверхность почвы охладится весьма заметно. Охладится настолько, что температура поверхности растительного покрова (или температура поверхности почвы в случае отсутствия растительности) станет ниже температуры окружающего воздуха. Сложится явление, называемое температурной инверсией, которая и вызывает смену знака турбулентного потока тепла. Все процессы обмена поддерживаются в этот период за счет турбулентного ветрового потока. Такие явления наиболее часто наблюдаются над оазисами, когда разогретый и сухой воздух из пустыни внедряется на небольшой высоте в оазисную зону. Однако нередко указывают, что и зоне достаточного увлажнения подобные явления отмечаются в том случае, если испарение превышает радиационный баланс, однако они ограничены как по времени, так и в протяженности.

Наконец, очень важно, что и для листа можно записать основное уравнение баланса энергии:



$$I_n^l - Q_s^l - Q_a^l - (Tr \cdot E)^l - M = 0,$$

где  $I_n^l$  – радиационный баланс листа, как разница между потоками абсорбированной и излученной листом энергии,  $Q_a^l$  – потери тепла на циркуляцию воздуха около листа,  $(Tr \cdot E)^l$  – теплопотери на испарение ( $Tr$  – транспирация листа,  $L$  – теплота парообразования),  $Q_s^l$  – теплопоток, формирующих теплозапасы листа, а  $M$  – энергия, накапливаемая в результате фотосинтеза в химических соединениях. Все составляющие имеют размерность теплопотоков, т.е. ватт/м<sup>2</sup>.

Здесь очень важно подчеркнуть, что следует различать все процессы, происходящие около одного растения или листа растения, от физических процессов, происходящих в растительном покрове. В растительном покрове значительную роль уже начинают играть процессы распределения физических факторов от поверхности растительного покрова до земной поверхности, т.е. процессы перераспределения энергии в архитектуре растительного покрова. Это еще раз подчеркивает важность изучения и создания оптимальной архитектуры растительного покрова.

### Фотосинтетически активная радиация - ФАР

Поступающая на растение радиация важна, по крайней мере, по трем причинам: (1) - скорость фотосинтеза тесно связана с количеством фотосинтетически активной радиации (ФАР); (2) - температура растения определяет скорость потребления и выделения радиации и (3) - фотоморфологические реакции растений определяются потреблением радиационной (солнечной) энергии в специфических длинах волн.

Как мы уже знаем, ФАР - это наиболее важная для продукционного процесса растений радиация, входящая в коротковолновую область. Растения способны потреблять прямую солнечную радиацию и отраженную от небесных и земных объектов в области длин волн от 380 до 710 нм. Поток фотосинтетически активной радиации составляет примерно половину всего солнечного потока, т.е. половину суммарной радиации, причем практически вне зависимости от метеоусловий и местоположения. Хотя, если для условий Европы характерна именно величина 0.50, то для условий Израиля она несколько больше (близка к 0.52). Такое деление солнечной радиации на фотосинтетически активную и близкорасположенную область инфракрасных лучей является достаточным для оценки, прежде всего фотосинтетических процессов в растениях. Нередко используют расчетные формулы для определения ФАР. Например, рассчитывают по данным о прямой и рассеянной радиации с соответствующими эмпирическими коэффициентами:

$$I_{ФАР} = 0.43I_s + 0.57I_a.$$

Отметим, что в этом уравнении тоже принято, что ФАР составляет ровно половину суммарной радиации, а также подчеркивается большее значение рассеянной радиации для формирования ФАР, - регрессионный коэффициент перед величиной рассеянной радиации выше.

Однако нельзя сказать, что растения одинаково используют ФАР на протяжении всей своей жизни и в различных условиях. Эффективность использования ФАР различно. Поэтому наряду с выделением ФАР был предложен показатель «коэффициент использования ФАР»,  $KI_{ФАР}$ , который отражает эффективность использования растения фотосинтетически активной радиации. Этот показатель является отношением количества энергии, запасенной в урожае, к поступившей за период формирования урожая энергии в виде ФАР:

$$KI_{ФАР} = \frac{U \cdot Y}{\sum Q_{ФАР}} \cdot 100, \text{ где } U - \text{удельная теплота сгорания (калорийность)}$$

растительных веществ, кДж/г,  $Y$  – урожай сухой фитомассы, кг/м<sup>2</sup>,  $\sum Q_{ФАР}$  - сумма ФАР за период вегетации, МДж/м<sup>2</sup>. Как видно из приведенного выражения  $KI_{ФАР}$  в числителе

стоит величина удельной теплоты сгорания –  $U$ , кДж/г, которую надо определять экспериментально. Впервые в России такие исследования провел А.Г.Дояренко, который сконструировал так называемую калометрическую бомбу, с помощью которой он имел возможность измерять количества тепла, выделяемого при сжигании растений. Впоследствии были предложены и другие методы определения калорийности растений, в том числе и метод расчета общей калорийности по содержанию составляющих растения веществ: крахмалу (он имеет удельную теплоту сгорания 17.5 кДж/г), целлюлозе (17.6), глюкозе (15.5), сырому протеину (23.0), жирам (38.9 кДж/г) и другим составляющим тканей растений. Величина  $KI_{\Phi AP}$  – величина динамическая, зависит от фаз развития растений. Причем динамика этой величины связана не только со знаменателем (что вполне понятно), но и с величиной  $q$ . Эта величина может иметь сезонный ход, как, например, у картофеля: в начале сезона она составляет 15.9, увеличивается в начале-середине августа в фазе цветения-клубнеобразования до 20 кДж/г, и снижаясь к концу вегетации (цит. по Костюк В.И., 1980). Известен также факт увеличения  $U$  при ухудшении факторов развития растений.

Наряду с величиной  $KI_{\Phi AP}$  вводят и еще одну характеристику эффективности использования ФАР, так называемый «коэффициент полезного действия фитоценозов» - КПД фитоценозов. Он определяется как отношение поглощенной растениями радиации к поступившей. Вполне понятно, что КПД фитоценозов характеризует фотосинтетическую активность растительного покрова. Этот параметр нашел наиболее широкое применение у лесоводов для оценки лесных фитоценозов, эффективности использования ФАР лесными сообществами. Так по данным В.А.Алексеева (цит. по Тооминг, 1984) среди 100-летних древостоев самыми эффективными в использовании солнечной радиации являются северные лиственничники (КПД=1.2%), а вот 80-летние еловые древостои имеют КПД около 1%. Очень высокий КПД у ясеневых древостоев – до 6% в 50-летнем возрасте, который снижается до 4.6% в 85-летнем. Такое снижение КПД указывает на ослабление растений, что и подтверждается тем фактом, что к 100-летнему возрасту ясеневые насаждения начинают сменяться мелколиственными породами.

А для посевов за вегетационный период КПД обычно не превышает 0.5÷1.5%, однако хорошие и рекордные посевы по величине КПД могут достигать 1.5÷3.0 и 3.0÷5.0%. В итоге, в самых редких случаях КПД фотосинтеза может достигать 6-8%, в среднем составляя около 2% (по А.А.Ничипоровичу).

#### Определения

**Коэффициент использования ФАР** – это отношение количества энергии, запасенной в образовавшейся фитомассе урожая к количеству поглощенной за период формирования урожая радиации  $KI_{\Phi AP}$ :

$$KI_{\Phi AP} = \frac{U \cdot Y}{\sum Q_{\Phi AP}} \cdot 100,$$

где  $U$  – удельная теплота сгорания (калорийность) растительных веществ, кДж/г,  $Y$  – урожай сухой фитомассы, кг/м<sup>2</sup>,  $\sum Q_{\Phi AP}$  – сумма ФАР за период вегетации, МДж/м<sup>2</sup>.

**КПД фитоценозов** – отношение поглощенной ценозом радиации к поступившей ФАР. Характеризует эффективность работы фотосинтетического аппарата и ростовых процессов.

Необходимо подчеркнуть, что растения сами способны формировать ФАР в растительном покрове. Это достигается благодаря расположению листьев по направлению к солнечным лучам, поворотам листьев, распределением листьев различного размера и угла наклона на разных уровнях фитоценоза, т.е. с помощью, так называемой архитектуры растительного покрова. В растительном покрове солнечные лучи многократно

преломляются, отражаются от листовой поверхности, тем самым, формируя свой, внутренний радиационный режим посевов.

Спектральный состав рассеянной радиации облачного неба в целом аналогичный спектральному составу прямой радиации. Следовательно, для продукционного процесса, для формирования ФАР рассеянная радиация имеет такое же значение, как и прямая. Кроме того, спектральный состав «солнечных бликов», отраженных от листьев лучей в растительном покрове признают аналогичным спектральному составу солнечной радиации над растительным покровом. Следовательно, и рассеянная внутри растительного покрова радиация имеет такое же фотосинтетическое значение, как и поступающая на поверхность растительного покрова прямая и рассеянная.

### Значение ветра

Отдельно следует подчеркнуть значение ветра, как фактора играющего большое значение в формирование теплового баланса и влажности приземного слоя воздуха и, следовательно, почвы. Действительно, мы рассмотрели тепловой баланс поверхности только лишь в одном направлении, по вертикали, без учета боковых притоков и оттоков тепла. Иначе говоря, рассмотрели лишь одномерную задачу формирования теплового баланса, хотя эта задача, конечно же, двумерная. Боковые притоки тепла и парообразной влаги, а также обмен тепла в слоях воздуха, происходят, прежде всего, за счет движения воздушных масс, за счет ветра.

Ветер, как движение воздуха, возникает в результате неоднородного нагрева земной поверхности. Соответственно, это движение воздушных масс переносит и тепло из мест более нагретых солнцем в более прохладные места. В агрофизике обычно не рассматривают общепланетарные переносы воздушных масс из экваториальных зон в полярные, а исследуют явления, имеющие более мелкий масштаб, т.е. местную циркуляцию.

Итак, основное значение ветра в формировании теплового баланса состоит в том, что ветер переносит тепло и водяные пары. Различают при этом горизонтальный и вертикальный перенос. Вертикальный перенос осуществляется, прежде всего, механизмом турбулентной диффузии, а горизонтальный за счет адвекции. *Турбулентная диффузия* осуществляется за счет движения некоторых объемов воздуха, струек на границах слоев. В ламинарных слоях перенос тепла и влаги происходит за счет процесса молекулярной диффузии благодаря хаотическому броуновскому движению молекул, а вот при турбулентной диффузии этот перенос происходит значительно быстрее, можно сказать, эффективнее за счет такого струйчатого переноса. Причем размер таких струек может быть от нескольких молекул до огромных воздушных масс при рассмотрении явлений общепланетарного значения. В большинстве случаев, при рассмотрении явлений масштаба ландшафта средний пробег отдельных струек превышает на несколько порядков свободный пробег молекул. Поэтому турбулентная диффузия на порядки превышает вертикальный перенос свойств, чем обычная молекулярная диффузия, хотя и последняя имеет большое значение в ламинарных потоках. За счет турбулентных потоков тепла поддерживаются рассмотренные выше «оазисные эффекты», приводящие к инверсии температуры почвы и приземного слоя воздуха.

Другой механизм, обуславливающий горизонтальный перенос тепла и влаги носит название *адвекции*. Адвекцией в метеорологии перенос воздуха (а вместе с ним и его свойств, тепла) в горизонтальном направлении, в отличие от конвекции, означающей перенос в вертикальном направлении. Так, адвекция тепла происходит при изменении температуры вдоль линий тока воздуха. Из этого определения следует, что адвекция коренным образом отличается от простого нагревания поверхности и воздушных масс в рассматриваемой точке. Тепло в рассматриваемую точку поступает за счет горизонтального перемещения благодаря градиенту температуры. Это более быстрый способ переноса тепла. Хотя градиенты рассматриваемых свойств в большинстве случаев

невелики, но типы поверхности, рельеф способны заметно увеличивать эти градиенты и приводить более заметному влиянию адвекции в процессе переноса тепла и влаги в атмосфере.

#### *Определения*

Перенос тепла и влаги в приземных слоях воздуха осуществляется за счет турбулентной диффузии и адвекции.

**Турбулентный перенос** осуществляет вертикальное движение тепла и влаги и определяется, прежде всего, средним свободным пробегом отдельных воздушных струек.

**Адвекция** – это перенос (в основном горизонтальный) тепла и водяных паров за счет соответствующих градиентов.

Распределение скоростей ветра в растительном покрове, также как и распределение скоростей ветра над поверхностью земли подчиняется логарифмическому закону:

$$u(z) = (u^* / k) \ln[(z + z_m - 0.77h)z_m]$$

где  $u^*$  – параметр динамического трения,  $z$  – высота,  $h$  – высота растительного покрова,  $z_m$  – параметр шероховатости,  $k$  – постоянная Кармана, которая обычно принимается равной  $0.13 h$ . Из этой формулы получается, что при  $z = 0.77h$  скорость ветра равна нулю, что не совсем и не всегда соответствует действительности. Однако, зная скорость ветра над растительным покровом (т.е.  $u^*$ ) и его высоту все же нередко используют именно это уравнение для расчета скорости ветра внутри растительного сообщества.

#### Литература

Мушкин И. Г. Влагообеспеченность сельскохозяйственных полей. Л.: Гидрометеиздат. 1971.

Слейчер Р., Макилрой И. Практическая микроклиматология. М.: Изд-во «Прогресс». 1964.

Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат. 1955.

## Глава II.2. Основные агрометеорологические характеристики

Для характеристики температурных и влажностных условий развития растений были предложены агроклиматические и агрометеорологические показатели. Предварительно уточним некоторые центральные понятия, связанные с климатом, метеоусловиями, погодой и науками, их изучающими.

### *Определения*

**Погода** – состояние атмосферы в рассматриваемом месте в определённый момент или за ограниченный промежуток времени (сутки, месяц, год), которое характеризуется набором метеорологических показателей: давлением, температурой, влажностью воздуха, силой и направлением ветра, облачностью (продолжительностью солнечного сияния), атмосферными осадками, наличием туманов, метелей, гроз и другими атмосферными явлениями.

Многолетний режим погоды называют **климатом**. Здесь важно подчеркнуть, что под многолетним режимом понимается совокупность всех условий погоды в данной местности за период нескольких десятков лет, т.е. это среднемноголетний режим. В понятие климат входит также и типичная годовая смена условий погоды и возможные отклонения от нее в отдельные годы, сочетания условий погоды, характерные для различных ее аномалий (засухи, дождевые периоды, похолодания и прочее).

Таким образом, климат - многолетний режим погоды, свойственный той или иной местности на Земле и являющийся одной из ее географических характеристик.

**Метеорология** (от греч. *metēōros* — поднятый вверх, небесный) - наука об атмосфере и происходящих в ней процессах. Метеорология, в отличие от синоптической метеорологии, которая представляет собой учение об атмосферных процессах крупного масштаба, процессов общей циркуляции атмосферы, занимается явлениями более локального масштаба, что объединяет ее с агрофизикой.

**Агрометеорология** - прикладная метеорологическая дисциплина, изучающая метеорологические, климатические и гидрологические условия, имеющие значение для сельского хозяйства, в их взаимодействии с объектами и процессами сельскохозяйственного производства. Вполне понятно, что агрометеорология тесно связана с биологией, почвоведением, географией и агрономией.

**Агроклиматология** - раздел климатологии, изучающий климат как фактор с.-х. производства.

Метеопараметры, которые составляет основу метеонаблюдений и всевозможных расчетов, – это температура, влажность и скорость ветра, а также жидкие и твердые осадки, испарение. Срочные (т.е. проведенные в определенный срок, в конкретное время) наблюдения за метеопараметрами (температура, скорость ветра и за другие) производятся обычно на высоте 2-х м (в метеорологической будке). Об основах метеонаблюдений – в конце этой главы.

В рамках агрофизики особенно важны агроклиматические и агрометеорологические показатели, характеризующие метеорологические, климатические и гидрологические условия. Эти показатели разделяются по их назначению на показатели: 1) светообеспеченности, 2) влагообеспеченности, 3) теплообеспеченности, 4) условия перезимовки и 5) комплексные или бонитетные показатели, учитывающие общую оценку всех или части условий произрастания растений. Кратко охарактеризуем эти показатели.

## Агроклиматические показатели

Световые ресурсы (светообеспеченность). Как известно, главным световым показателем для растений является величина ФАР. Поэтому для характеристики светообеспеченности используют число часов с солнечным сиянием. Важным в отношении фотосинтетической активности является и гелиотермический показатель Жеслина, являющийся произведением сумм температур на длину светового дня.

Гидроресурсы (влагообеспеченность). Конечно, для вегетации растений наиболее важным является запасы доступной влаги в корнеобитаемой толще почвы. За корнеобитаемую принимают либо толщу 0-20см в начальный период вегетации, либо 0-100 см. А доступная влага – это разность между реальными запасами за вычетом величины влажности при влажности завядания растения ( $B_3$ ). Эти величины обычно выражаются в мм или см водного слоя.

Учитывая, что почвенные запасы формируются в основном за счет разности осадков и испарения влаги, было предложено большое количество разнообразных показателей увлажнения. Перечислим наиболее часто употребляемые:

Коэффициент Селянинова, называемый гидротермическим коэффициентом ( $ГТК$ ):

$$ГТК = \frac{\sum p}{0.1 \sum T_{10}},$$

где  $p$  - осадки, а  $T_{10}$  – температура выше  $10^{\circ}\text{C}$ . Г.Т.Селянинов заметил, что в теплые месяцы, для которых особенно важна обеспеченность осадками, суммы температур, уменьшенные на порядок, хорошо совпадают с суммами испаряемости за месяц. А это значит, что в знаменателе  $ГТК$  указана практически испаряемость, а отношение осадков к испаряемости и есть показатель влагообеспеченности территории, подчеркнем! – для теплого периода, для вегетационного сезона.

Еще один широко используемый коэффициент для оценки климатических условий, - это коэффициент увлажнения по Иванову ( $KУ$ ):

$$KУ = \frac{\sum p}{E_0},$$

где  $E_0$  – испаряемость, т.е. суммарное испарение с поверхности воды за период, соответствующий измерению суммы осадков ( $p$ ). Вполне понятно, что при приближении этого показателя к единице, климатические условия становятся влажными и избыточно влажными, а при 0.5 – это условия степи,  $<0.1$  – пустыни.

Коэффициент увлажнения ( $K_y$ ) по Сапожниковой:

$$K_y = \frac{B + p}{0.18 \sum T_{10}},$$

где  $B$  – осадки за зимне-весенний период. Как видно, отличие этого коэффициента от  $ГТК$  лишь в учете зимне-весенних осадков.

Коэффициент увлажнения ( $K_y$ ) по Слядневу и Сенникову:

$$K_y = \frac{3B_{100} + p}{E_0},$$

где  $3B_{100}$  – запасы влаги в 100-см толще почвы,  $E_0$  – испаряемость.

Как видно из приведенных формул все они основаны на одном принципе: соотношении приходных (осадки) и расходных (испарение, чаще всего в виде суммы температур выше  $10^{\circ}\text{C}$ ) статей.

Комплексные показатели продуктивности. Комплексная оценка метеоусловий для характеристики продуктивности растительного сообщества, так называемый бонитет климата осуществляется обычно по соотношению урожая культуры к сумме эффективных температур. Например, показатель Сапожниковой и Шашко:

$$B_{\text{климата}} = \frac{Y}{\sum T_{>10^{\circ}\text{C}} : 100},$$

где  $B_{\text{климата}}$  – показатель бонитета климата,  $Y$  – урожай культуры (в ц/га),  $\sum T_{>10^{\circ}\text{C}}$  – сумма средних температур воздуха выше  $10^{\circ}\text{C}$ .

Более точно оценивать бонитет климатических условий возможно по соотношению фактической урожайности и потенциальной продуктивности климата. Для этого используют понятие об эталонных урожаях, которые можно найти с помощью моделей продукционного процесса и формирования урожая. (Более подробно об этом - в книгах Х.Т.Тооминга, 1977, 1984).

**Теплообеспеченность.** Основными показателями терморесурсов территории и потребности растений в тепле являются суммы активных и эффективных температур. *Активная температура* – это среднесуточная температура воздуха после перехода через биологический нуль развития данной культуры. Действительно, для каждой культуры свойственен свой собственный биологический нуль, после достижения, которого растение начинает активно вегетировать. Для большинства зерновых биологическим нулем является температура  $5^{\circ}\text{C}$ , хотя для многих растений эта температура повышается до  $15-17^{\circ}\text{C}$ . Например, у озимых и ранних яровых зерновых среднесуточная температура начала вегетации составляет около  $5^{\circ}\text{C}$ , у поздних яровых она в два раза выше – около  $10^{\circ}\text{C}$ , а у теплолюбивых растений, таких как рис, хлопчатник уже  $15^{\circ}\text{C}$ , не говоря о тропических теплолюбивых (сахарный тростник, финиковые пальмы), у которых она составляет  $20^{\circ}\text{C}$ . Соответственно, для характеристики теплообеспеченности данного района надо сложить все среднесуточные температуры для тех дней, когда эти температуры превышали биологический нуль. Мы получим сумму активных температур. Вполне понятно, что для различных культур эта сумма неодинакова: для нетребовательных к теплу овощных растений она составляет всего  $400-500^{\circ}\text{C}$ , а для тропических многолетних возрастает больше, чем на порядок, до  $5000-6000^{\circ}\text{C}$ .

Кроме активной температуры используют еще и показатель эффективной температуры. *Эффективная температура* – это разность между среднесуточной температурой и биологическим нулем для данной культуры. Получается, что при подсчете суммы активных температур складывают все среднесуточные температуры для определенного периода, а для суммы эффективных температур – суммируют разности между среднесуточной температурой и биологическим нулем.

В большинстве случаев, для стандартизации и удобства сравнения теплообеспеченности разных территорий за биологический нуль принимают температуру в  $10^{\circ}\text{C}$ . Тогда можно сложить все среднесуточные температуры для тех дней, когда среднесуточная температура превышала  $10^{\circ}\text{C}$ . Эта величина также будет характеризовать теплообеспеченность территории, термические ресурсы. Период с активными температурами воздуха в северо-таежной подзоне равен 80-90 дням. К югу, естественно, он увеличивается, достигая 160-170 суток.

#### *Определения*

Все показатели агроклиматических условий можно характеризовать по следующим критериям (подробнее – см. «Справочные материалы», табл.10 Приложения):

**Абсолютные:** минимумы и максимумы температур и др.;

**Средние:** среднегодовая температура, средняя скорость ветра и др.;

**Суммарные:** сумма температур  $>10^{\circ}\text{C}$ , сумма осадков за год и др.;

**По датам (срочные):** дата прохождения среднесуточной температуры через 0, сходы снежного покрова и др.;

**Вероятность:** суховея, скорости ветра больше 5 м/сек и др.

**Коэффициенты:** влагообеспеченности, теплообеспеченности и др., основанные на соотношении приходных и расходных статей баланса влаги, тепла и пр.

Используя показатели эффективных температур, суммы эффективных температур и другие приведенные выше агроклиматические показатели можно прогнозировать наступления фаз развития растений, влагообеспеченность и другие, важные в отношении формирования урожая показатели. Это большой и важный раздел агрофизики – агрометеопрогнозы.

## Агропрогнозы

### Прогноз фаз развития растения

На использовании величин активных или эффективных температур, на знании биологического нуля для конкретного растения основаны прогнозы наступления фаз растений. Действительно, получается, что сумма эффективных температур характеризует наступление и длительность фазы развития. Поэтому, иногда сумму эффективных температур называют *биологическим временем*. Это понятие позволяет формировать прогнозные уравнения типа

$$y = \frac{A}{T - B},$$

где  $y$  – продолжительность межфазного периода,  $A$  – сумма эффективных температур, необходимая для прохождения фазы,  $T$  – среднемесячная температура и  $B$  – свойственное данному растению значение нижнего предела начала фазы, биологический ноль для конкретной фазы развития.

Примером может служить формула Л.Н.Бабушкина для расчета цветения плодовых растений в Средней Азии. Для яблони эта формула выглядит следующим образом

$$y = \frac{200^\circ}{T - 6^\circ}.$$

Очень важно отметить, что для вегетации растений существенное значение имеет не только активная или эффективная среднесуточные температуры, но суточный ход температуры. У растений отмечено явление, называемое *термопериодизмом*, заключающее в том, что процессы роста и развития идут быстрее в том случае, если амплитуда температур между днем и ночью выше. Сравнительно высокие (не выше 35-45°C) температуры днем и относительно низкие ночные температуры способствуют продукционному процессу в растениях, накоплению органических веществ.

В связи с важностью тепло- и влагообеспеченности растений отдельно стоит вопрос о прогнозах этих ресурсов, т.е. об агрометеопрогнозах.

### Агрометеопрогнозы тепло- и влагообеспеченности растений

В случае прогноза тепло- и влагообеспеченности растений также используется показатель биологического нуля, принимаемого, как отметили выше за 10 °C. По дате перехода средней суточной температуры через 10°C весной можно определить ожидаемую сумму активных температур за вегетационный период: чем позже весной переходит среднесуточная температура воздуха через 10-градусную отметку, тем меньшая сумма температур накапливается за вегетационный период. Поэтому для расчета суммы активных температур используют обычные линейные регрессионные уравнения, полученные на основе длительного ряда метеонаблюдений. А.М.Шульгин (1978) приводит одно такое уравнение для условий Ленинградской области:

$$\sum T_{>10^\circ C} = -18.25D + 2759,$$



где  $\sum T_{>10^{\circ}\text{C}}$  - прогнозируемая сумма активных температур,  $D$  – дата весеннего перехода температуры воздуха через  $10^{\circ}\text{C}$ , отсчитанная от 1 апреля.

Прогноз запасов влаги особенно важен для весенних полевых работ. Прежде всего, надо знать каковы будут запасы влаги весной, в начальный, самый важный период роста растений. Этот прогноз основан на балансовом принципе. Он учитывает количество осадков, выпавшее за зимний период до перехода температуры через  $5^{\circ}\text{C}$  весной и дефицит запасов влаги осенью, как разность между наименьшей влагоемкостью и реальными осенними запасами влаги в конкретной толще почвы. Тогда изменение запасов влаги от конца осени до начала весны ( $\Delta ZB$ ) составит, например, для районов с устойчивой зимой

$$\Delta ZB = 0.115r + 0.56d - 20,$$

где  $r$  – выпавшие за зимний период осадки,  $d$  – дефицит почвенной влаги осенью в рассматриваемом слое почвы.

Аналогичным образом, используя балансовые принципы, построены и регрессионные прогнозные уравнения расчета запасов влаги для различных периодов вегетации растений.

Конечно же, самым сложным является прогноз температуры и влажности воздуха, испарения (эвапотранспирации) для вегетационного периода. Такого рода прогнозы чрезвычайно важны как самостоятельно, для управления продукционным процессом, агротехническими и другими приемами, так и для использования их в прогнозных математических моделях. В таких моделях, как модели управления агрохимикатами (например, пестицидами), оптимизацией их внесения. Оптимум внесения этих веществ в почву будет тогда, когда они окажут действие на появившиеся сорняки и не попадут в растительную продукцию, в нижележащие слои почвы и в грунтовые воды. Для этого, прежде всего надо знать динамику температуры и влажности воздуха для расчета температуры почвы (такого рода расчеты мы рассмотрели в разделе о температуре почвы) и испарения (это тоже известные подходы, которые мы рассмотрим чуть ниже). В такого рода расчетах используют так называемый «симулятор погоды», т.е. расчет погоды на основе специального алгоритма. Этот алгоритм основан на двух допущениях: (1) если известно точное географическое место, и для этого места известны общие закономерности динамики температуры, влажности воздуха, испарения, то эти закономерности будут соблюдаться и в конкретном случае и (2) отличия в ту или иную сторону от среднесноголетней динамики этих важнейших метеопараметров будут зависеть от начального, как правило, весеннего периода. Для расчета метеоусловий за весь период симулятор погоды надо «настроить» по конкретным данным некоторого весеннего периода. Тогда он способен довольно точно предсказать и метеоусловия на длительный срок, на любой день вегетационного периода. Такой подход вполне естественен и проверен всей исторической практикой фенологических наблюдений, которая отразилась во множестве пословиц и поговорок, касающихся прогнозов погоды или урожая по некоторым весенним дням: «Ясный восход на Якова – хорошее сухое лето» (Яков – 13 мая), «Коли на Антипа воды не скрылись, то весна поздняя и плохое лето предстоит» (Антип – 24 апреля).

### **Испарение, испаряемость и эвапотранспирация**

Как видно из приведенных выше оценочных коэффициентов, для характеристик климатических и погодных условий важнейшее значение имеет определение испарения и испаряемости. Особенно важно это для оценки влагообеспеченности растений. Механизмы формирования потока влаги в системе почва-растение-атмосфера мы будем обсуждать в следующей части, в разделе «Растение и влага».

В данном разделе рассмотрим закономерности формирования испарения и испаряемости. Первоначально остановимся на закономерностях испарения влаги с

поверхности почвы и открытой водной поверхности воды, т.е. на *испарении* и *испаряемости*, а также на метеохарактеристиках воздуха их определяющих.

#### *Определения*

**Испарение влаги ( $E$ )** – потеря воды из почвы в газообразном состоянии. Выражается в виде потока влаги в единицу времени [см/сут, мм/час и др.]. Иногда для того, чтобы отделить испарение от транспирации используют термин «Испарение физическое», который подчеркивает, что испарение происходит с поверхности почвы или капельно-жидкой влаги с поверхности листьев, но не через устьица, а именно с листовой поверхности.

**Испаряемость ( $E_0$ )** – количество воды, испаряющееся в данных условиях с открытой водной поверхности большой площади в единицу времени.

**Суммарное испарение (эвапотранспирация)** – сумма испарения физического и транспирации.

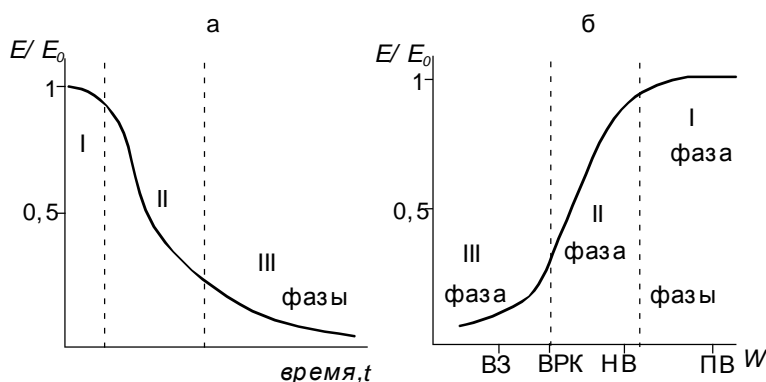
#### *Характеристики влажности воздуха:*

**Удельная влажность воздуха ( $W, \%$ )** — количество водяного пара в  $g$  на  $kg$  влажного воздуха; **Относительная влажность, или относительное давление паров воды ( $W/W_0, p/p_0$ )** — отношение упругости (или влажности) водяного пара, содержащегося в воздухе, к максимальной упругости (или влажности) водяного пара, насыщающего пространство над плоской поверхностью чистой воды при данной температуре. Выражается в %

**Упругость (или парциальное давление),  $e$**  – давление паров воды в воздушной смеси газов. Выражается в  $н/м^2$  (в  $мм\ рт.\ ст.$  или в  $мб$ ,  $1\ мб = 10^2 \cdot н/м^2$ ).

**Дефицит** (от лат. *deficit* — недостаёт) **влажности или упругости,  $d$**  - в разность между максимально возможной ( $E$ ) и фактической ( $e$ ) упругостью водяного пара при данных температуре и давлении:  $d = E - e$ . Упругость пара в полярных широтах зимой меньше  $1\ мб$  (иногда лишь сотые доли  $мб$ ), а летом ниже  $5\ мб$ ; в тропиках же она возрастает до  $30\ мб$ , а иногда и больше. В субтропических пустынях  $e$  понижена до  $5—10\ мб$ . Годовой ход упругости пара параллелен годовому ходу температуры воздуха.

Для описания агрофизических процессов наиболее важен и интересен процесс испарения влаги из почвы. Если исследовать испарение влаги из предварительно насыщенной почвенной колонки, то сначала испарение будет равно испаряемости, и величина  $E/E_0$  будет близка к единице, возможно, даже ее несколько превышать. Превышение возникает за счет того, что вода на шероховатой поверхности почвы не будет строго горизонтальна, будут выражены мениски, из которых испарение выше. Через некоторое время по мере иссушения поверхности почвы испарение начнет заметно снижаться – величина  $E/E_0$  начнет стремительно падать. А еще через некоторое время, снизившись до сотых долей, асимптотически начнет приближаться к оси времени (рис. П.2.1, а). Динамика испарения имеет отчетливо выделяющиеся три фазы. Они заметны и при анализе зависимости относительного испарения от влажности почвы: первая фаза – от водовместимости до величин, несколько превышающих НВ. Вторая – примерно соответствует диапазону от НВ до ВРК, а третья – при влажности менее ВРК, когда практически отсутствует быстрое капиллярное восходящее движение, испарение плавно стремится к нулю (рис. П.2.1, б).



**Рис. П.2.1.** Изменение относительного испарения влаги из почвы ( $E/E_0$ ) в зависимости от времени (а) и влажности почвы (б)

Итак, процессу испарения влаги из почвы свойственны три характерные фазы:

1-я фаза «интенсивного испарения». Здесь испарение определяется только метеоусловиями. Для этой стадии справедливо уравнение Дальтона, связывающее испарение с влажностью воздуха ( $w$ ) и параметрами, отражающими скорость ветра и градиент температуры ( $D_d$ ):

$$E = r_a D_d (w_0 - w_z),$$

где  $w_0$ ,  $w_z$  и  $\rho_a$  – влажности и плотность воздуха на поверхности почвы и высоте  $z$ ,  $D_d$  – коэффициент скорости обмена, зависящий от скорости ветра и вертикального градиента температуры. Так как на этой фазе испарение зависит от метеопараметров (в основном от температуры и влажности воздуха), нередко его рассчитывают и по эмпирическим формулам для длительных промежутков времени. Примером такого рода уравнений может служить уравнение Н.Н.Иванова для расчета среднемесячного испарения:  $E = 0.0018(T + 0.25)^2 \cdot (1 - w)$ , где  $T$  – среднемесячная температура воздуха,  $w$  – среднемесячная относительная влажность воздуха. Имеется и ряд формул, позволяющих рассчитывать испарение на этой стадии (фактически испаряемость) по данным о тепловом и радиационном балансах поверхности почвы.

2-я фаза – «убывающего испарения». Наблюдается при иссушении тонкого поверхностного слоя почвы. Испарение происходит у нижней границы просохшего слоя. На этой фазе испарение определяется скоростью подтока воды к поверхности испарения, т.е. гидрофизическими свойствами почвы, а также (значительно в меньшей степени) и метеоусловиями. Динамику испарения на этой фазе нередко описывают с помощью достаточно простого уравнения:

$$E = \frac{1}{2} D_e t^{-\frac{1}{2}},$$

где  $D_e$  – величина, обычно называемая коэффициентом десорбции.

3-я фаза – фаза «низкого испарения». На этой фазе восходящее движение влаги практически прекращается. Происходит увеличение толщины просохшего слоя – медленно иссушаются все более глубокие слои почвы. Учение о фазах испарения родилось давно, возможно еще во времена Древней Греции (см. «К вопросу о...»)

*К вопросу о...*

Двойственная природа испарения (исторический очерк).

С древнейших времен пытливые люди наблюдали и пытались объяснить природу испарения воды. Они замечали, что испарение – процесс явно изменчивый, зависит от условий испарения, от интенсивности солнечного излучения. И даже пытались как-то классифицировать испарение на стадии, этапы, формы. Причем делалось это нередко в поэтической, метафорической форме. Например, Гераклит из Эфеса в 500-е

годы до н.э., так писал о двух типах испарения (цит. по Братсберг У.Х. «Испарение в атмосферу» Л., Гидрометеиздат, 1985, 351 с.):

«Выделение влаги происходит как с земной, так и с морской поверхности: первому присущи свет и чистота, последнему – темнота; тепло есть свойство светлого испарения, влага – всех прочих.... День и ночь, месяцы, времена года, годы, дожди, ветры и прочие явления происходят в результате разного вида испарений. Ибо светлые испарения, возжигающиеся в солнечной орбите, создают день, когда верх одерживают противоположные силы, наступает ночь. При увеличении тепла при светлом испарении наступает лето. Зима приходит, когда преобладает влага при темном испарении».

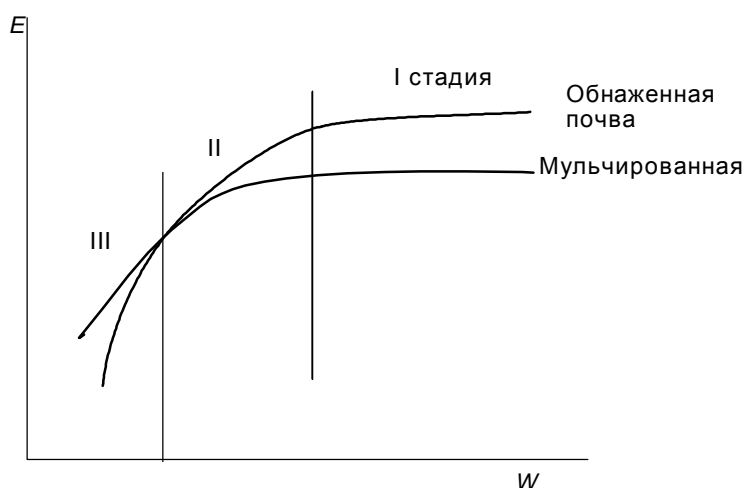
Уже в те далекие времена мыслители пытались связать испарение с климатом, указывая на различный характер испарения. Еще более четко два этапа испарения трактуются великим Аристотелем (384-332 гг. до н.э.), который кроме своих знаменитых трактатов по философии и политике написал также и трактат «О метеорологических вопросах»:

«... в земле содержится много огня и теплоты; Солнце между тем не только увлекает вверх влагу с земной поверхности, но, нагревая землю, высушивает ее самое. А поскольку, как было сказано, испарение двоякообразное и дымообразное, должны возникать обе (разновидности). Испарение, содержащее большое количество влаги, является, как было сказано ранее, началом дождевой воды, а сухое испарение – началом и природной естественной субстанцией ветров».

Это ли не является началом учения о двух фазах испарения? На первой стадии испарение происходит интенсивно со скоростью, равной испаряемости. А на второй стадии, когда испарение лимитируется внутрипочвенным подтоком влаги к испаряющей поверхности, эта поверхность начинает нагреваться. От поверхности почвы прогревается приземный слой атмосферы, рождаются ветры, формируется климат данной территории. В основе же всего лежит гипотеза о двух стадиях испарения, которые, оказывается, различаются не только по физическому процессу, но и по своему результату: роль первой, в основном, в планетарном влагообороте, второй – в увеличении количества доли солнечной энергии, расходуемой на нагревание почвы и приземного слоя воздуха. Прочтите еще раз последнюю фразу из Аристотеля, воздавая должное гениальной прозорливости великого грека.

---

Естественно желание использовать отмеченные закономерности, в частности, искусственным образом перевести испарение из первой на третью стадию, быстро понизить испарение. Этого можно достичь с помощью специального приема – мульчирования поверхности почвы. *Мульчирование* – покрытие поверхности почвы разнообразными материалами органического и неорганического происхождения (солома, торф, пленки и пр.) для снижения потерь почвенной влаги на испарение, а также для регулирования температуры, борьбы с сорняками. В данном случае важно то, что с помощью создания на поверхности сухого мульчирующего слоя из рыхлого материала практически сразу испарение переводят из первой (свойственной обнаженной почве) в третью (свойственную сухой мульче) фазу. Это значительно снижает испарение, так как испарение уже будет происходить по-другому, прежде всего в отношении первой стадии. На рис. II.2.2 представлена зависимость испарения от влажности почвы при обнаженной поверхности и покрытой мульчей. Наглядно видно, что снижение испарения происходит только в области влажной почвы, т.е. мульчирование эффективно лишь при высокой влажности почвы. Именно поэтому эффективность мульчирования как мероприятия для сохранения влаги в почве высока лишь для влажных почв.



**Рис.П.2.2.** Зависимость испарения с поверхности обнаженной и мульчированной почвы

### Метеорологические методы определения эвапотранспирации

Эти методы основаны на определении величины испарения растительного покрова и сравнения этого испарения с испаряемостью, т.е. с испарением с поверхности воды.

Причем, как и в случае с суммарным испарением, суммами температур, для характеристики условий за какой-либо период пользуются суммой величин, вызывающих испарение воды растительным покровом. Это (использование кумулятивных, суммарных показателей) – общий принцип для характеристики метеоусловий для конкретного периода.

Метод Алпатъева основан на использовании дефицита упругости водяного пара и так называемых биологических коэффициентов. В этом подходе потребность растений в воде измеряется в виде суммарного испарения растительного покрова. Эту величину можно сравнить с фактическим испарением, а чаще сравнивают с испаряемостью. Этот подход основан на положении о том, что сомкнутый растительный покров при оптимальном водоснабжении испаряет столько же, сколько испаряется с поверхности воды. Биологический коэффициент представляет собой суммарное потребление влаги растительным покровом, приведенное к испаряемости при нормальных (усредненных) метеоусловиях. В результате, надо только уметь рассчитывать суммарное испарение растительного покрова. По методу Алпатъева суммарное испарение фитоценоза рассчитывают по формуле:

$$E_{0\Sigma} = k\Sigma d,$$

где  $E_{0\Sigma}$  – суммарное испарение растительного покрова за определенный период времени (мм, см водного слоя),  $k$  – биологический коэффициент [мм/мб, см/мм рт.ст],  $\Sigma d$  – сумма дефицитов (мм рт.ст. или мб). Величина суммарного испарения или суммарного водопотребления фитоценоза за рассматриваемый промежуток времени представляет собой сумму отдельных составляющих водного баланса фитоценоза:

$$E_{0\Sigma} = \Delta W + m + mP + B,$$

$\Delta W$  – влага используемая из метрового слоя почвы,  $m$  – поливная влага,  $\mu P$  – используемые осадки ( $\mu$  – коэффициент эффективности осадков, учитывающий перехват части осадков растительным покровом, испарение капель дождя и проч. ) и  $B$  – подток

влаги в расчетную толщу из глубинных слоев. Все величины в мм или см водного слоя и т/га.

Биологические коэффициенты - это переменные величины, зависящие как от почвенно-климатических условий, так и от самих растений. Более того, эти коэффициенты меняются в течение вегетационного сезона, что приводит к динамическим кривым потребления воды, или так называемым биологическим кривым. *Биологические кривые* – это динамика испарения влаги растительным покровом при оптимальной обеспеченности растений водой. Они отражают изменение потребности растения во влаге в течение вегетационного сезона в условиях их выращивания. Поэтому биологические кривые специфичны не только для каждого вида растений, но зависят от природно-климатической зоны и условий минерального питания. Примеры таких кривых приведены на рис.П.2.3.

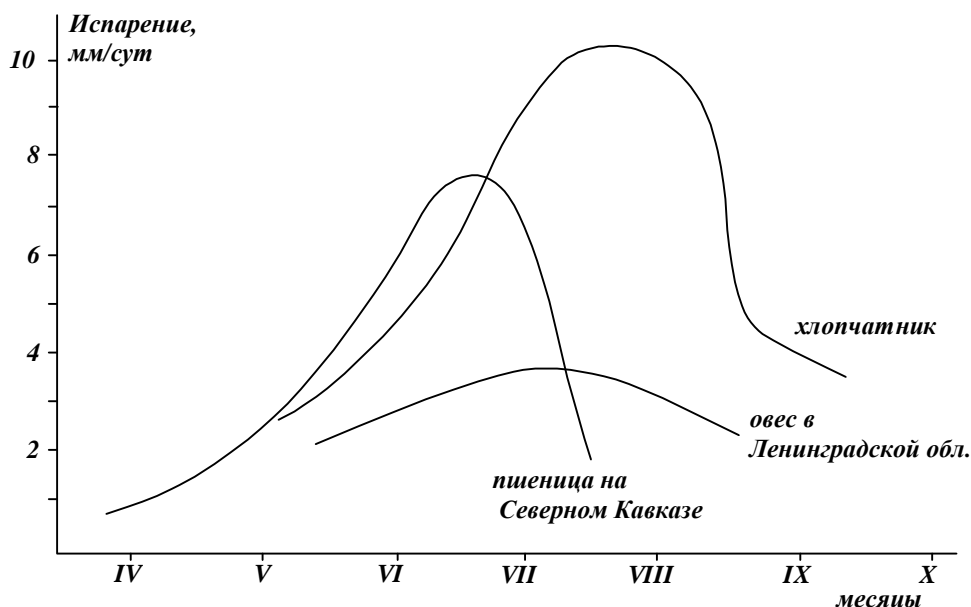


Рис. П.2.3. Биологические кривые различных сельскохозяйственных растений (по А.М.Шульгину, 1978).

Метод М.И.Будыко также основан на том, что при оптимальной влажности почвы растительный покров испаряет со скоростью, равной испаряемости. Испаряемость же, по Будыко, пропорциональна дефициту водяных паров, рассчитанному по температуре испаряющей поверхности, и в самом общем виде определяется по уравнению:

$$E_0 = r_a D (W_s - W),$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $D$  – интегральный коэффициент турбулентной диффузии, а  $w_s$  и  $w$  – удельные влажности насыщенного водным паром воздуха, которая рассчитывается по температуре испаряющей поверхности, и влажность в данный момент времени. Как видим, формула Будыко близка по формальному виду к уравнению Дальтона, приведенного выше для 1-й стадии испарения влаги из почвы. И хотя физические величины в них несколько отличаются, все же формула Будыко имеет физическое обоснование. С использованием этого уравнения можно рассчитать влагообеспеченность растительного покрова. Для этого, как и в случае метода Алпатьева, определяют как разность между рассчитанной испаряемостью и реальным испарением. Эта методика доведена до многочисленных расчетных формул, номограмм, которые используются для расчета режима орошения сельскохозяйственных культур.

### Определение испаряемости методами радиационного баланса

Следующие два метода оценки влагообеспеченности основаны на соотношении водного и теплового балансов. Действительно, тепловой баланс территории представляет собой взаимосвязанное соотношение радиационного и водного балансов. Вспомним уравнение теплового баланса:

$$I_n - Q_s - H_a - LE = 0,$$

в котором радиационный баланс  $I_n$ , расходуется на нагрев почвы и приземного слоя воздуха ( $Q_s$  и  $H_a$ ) и на испарение воды растительным покровом ( $LE$ ). Значит, изучая тепловой баланс поверхности, появляется возможность оценить и величину испарения. На этом основаны методы определения испаряемости по составляющим теплового баланса территории. Это методы, предложенные С.И.Харченко и Х.Пенманом.

Метод С.И.Харченко основан на использовании уравнения теплового баланса с учетом того, что при снижении запасов влаги ниже продуктивного ( $HB-B3$ ) испарение растительного покрова снижается. А для испаряемости можно использовать формулу:

$$E_0 = b \frac{I_n - Q_s}{L(HB - B3)} HB,$$

где  $HB$  и  $B3$  – запасы влаги в соответствующей толще почвы при наименьшей влагоемкости и влажности завядания, а  $b$  – коэффициент, учитывающий биологические особенности культуры. Если внимательно сравнить уравнение теплового баланса и формулу С.И.Харченко, становится совершенно ясно, что физические основы расчетной формулы Харченко заключаются в использовании уравнения теплового баланса с учетом обратно-пропорционального уменьшения испарения с увеличением диапазона доступной влаги. Таким образом, появляется возможность определять испарение с растительного покрова на основании измерения составляющих теплового баланса.

Другой физически обоснованный подход определения испаряемости растительного покрова предложен Х.Пенманом. Х.Пенман (Penman, 1948) при выводе своего знаменитого уравнения определения испаряемости исходил также из энергобалансового метода. Но он дополнил его еще и аэродинамическим методом, с помощью которого он рассчитал количества тепла, пошедшее на нагревание приземного воздуха. При этом возникла необходимость четко оговорить стратификацию воздушного потока для применения некоторых расчетных формул для коэффициента обмена. В результате было получено следующее уравнение:

$$LE = \frac{\left(\frac{\Delta}{\chi}\right) I_n + LE_a}{\frac{\Delta}{\chi} + 1}$$

где  $E$  – скорость испарения,  $L$  – скрытая теплота парообразования,  $\Delta$  – угол наклона кривой зависимости давления насыщенных паров воды от температуры,  $\chi$  – психрометрическая константа,  $I_n$  – радиационный баланс (или чистая радиация),

$LE_a = 0.35(e_a - e)(0.5 + \frac{v_2}{100})$ , где  $e_a$  и  $e$  – насыщенное и среднее давление паров воды в воздухе при данной температуре и давлении (размерность – [мм ртутного столба]); т.е.  $(e_a - e)$  – дефицит насыщения воздуха водяным паром,  $v_2$  – средняя скорость ветра (в [милях/сут]) на высоте 2 м от уровня поверхности почвы. Уравнение позволяет рассчитывать потенциальную эвапотранспирацию по измерениям радиационного баланса, температуры, давления паров воды и скорости ветра на высоте 2 м от поверхности.

Таким образом, метод Пенмана позволяет рассчитать испаряемость (потенциальную эвапотранспирацию) по стандартно измеряемым метеопараметрам. Но, хотя метод имеет достаточное физическое обоснование, все же нередко довольно трудно избежать ошибок

вследствие определенной стратификации воздушного потока при выводе этой формулы, которая в природе, конечно, соблюдается далеко нечасто. Поэтому всегда в качестве основных (опорных) используют экспериментальные методы.

### Экспериментальные методы определения эвапотранспирации

Основным методом определения испарения является определение испарения с помощью специальных *испарителей*. Испарители представляют собой большие емкости, высотой от 40 до 150 см, заполненные почвой, при необходимости, и с растущими растениями, которые регулярно взвешиваются. По потере в весе определяют испарение. Корпус испарителя имеет сетчатое дно, через которое стекает избыток воды (рис.П.2.4)

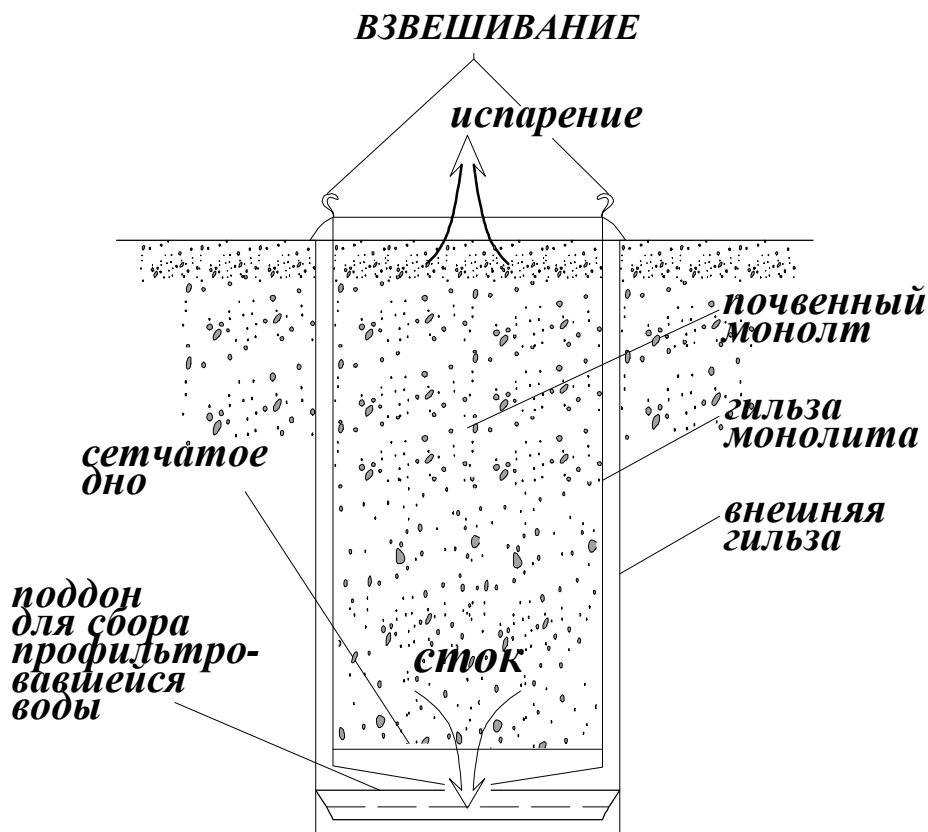


Рис. П.2.4 Схема устройства испарителя.

Почвенные испарители устанавливают в специальные кожухи так, чтобы поверхность почвы в испарителе совпадала с поверхностью поля. Взвешивают испарители с интервалом 3-5 дней, что позволяет, например для испарителей ГГИ-500-50 (испаритель Государственного Гидрологического института с площадью испаряющей поверхности 500 см<sup>2</sup> и мощностью почвенного монолита в 50 см) получать данные по суммарному испарению с точностью до 0.2-0.3 мм водного слоя в сутки.

Нередко, при длительных стационарных измерениях испарения, используют так называемые гидравлические испарители. В этих испарителях почвенный монолит взвешивается в гидравлическом устройстве, «плавающий» в специальном баке с водой. Изменения веса монолита фиксируются по вертикальным перемещениям этого «плавающего» монолита, нередко с помощью различных электроконтактных и других приборов.

Однако и методы почвенных испарителей имеют свои недостатки. Первый — необходимость периодической смены почвенных монолитов. Действительно, поддон



монолита собирает гравитационно стекающую воду, но является преградой для капиллярной подпитки монолита из нижележащих почвенных слоев. Поэтому в засушливых условиях монолит иссушается значительно сильнее, чем естественная почва и заметно искажает реальные величины испарения. Рекомендуют для наблюдений за испарением в зоне недостаточного увлажнения менять почвенные монолиты не реже двух раз в месяц. В этих условиях можно достичь надежных и точных результатов по измерению испарения.

### Рельеф как фактор агроклимата

В метеорологии принято склоны разной экспозиции называть полярными. Так, например, склоны южной и северной экспозиций – полярные склоны. Причем общей закономерностью является следующая: с продвижением от средних широт к высоким разница в их тепловлагообеспеченности увеличивается. При этом именно элементы рельефа являются постоянными и устойчивыми факторами во всех широтных зонах, которые дифференцируют агрофизические условия в пространстве склоновых ландшафтов по тепловлагоресурсам, обуславливают их неоднородность как по срокам наступления фаз растений, условиям агротехнической обработки и другим агрофизическим факторам.

Распределение тепловлагоресурсов на полярных склонах весьма схематически изображено на рис.П.2.5.

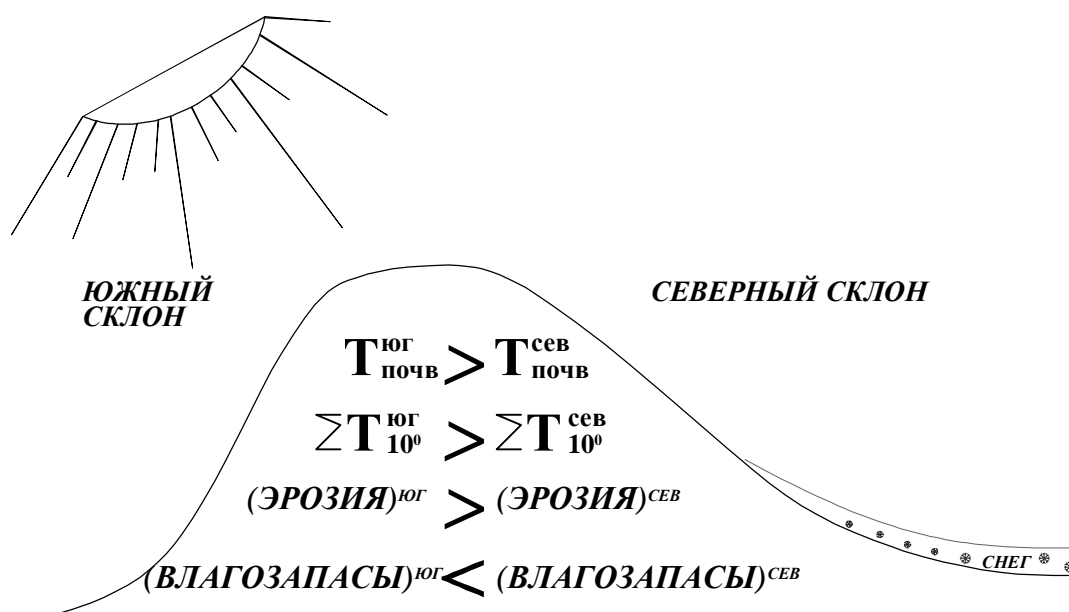


Рис.П.2.5. Распределение агрофизических факторов и свойств почв в зависимости от экспозиции склона.

Вполне естественным представляется тот факт, что наиболее обеспеченными солнечными радиационными ресурсами, независимо от климатической зоны являются южные склоны, наименее – северные, плато занимают промежуточное положение. Северные же склоны, независимо от климатических особенностей региона и типа почвы, обладают более высоким содержанием влаги, чем южные. Причем эта разница во влагообеспеченности сохраняется и в верхней, средней, и нижней частях склона, независимо от формы профиля, а водораздельная часть, плато, по влагообеспеченности занимает промежуточное положение. Но все же наблюдаются местные особенности

крутизны склонов, преимущественные направления ветра и особенности ветрового режима в рельефе. Так, хорошо известно, что наветренные склоны удерживают меньше снега, чем подветренные. В то же время, на наветренных склонах толщина слоя снега уменьшается от подножия к вершине, а вот на подветренных – наоборот, больше снега скапливается в верхней части склона.

Более того, следует иметь в виду, что приведенное выше положение о большей тепло и меньшей влагообеспеченности южных склонов, может несколько трансформироваться в различных природных зонах. Например, в зоне степи, в черноземной зоне, южные склоны, безусловно, получают больше энергии, быстрее прогреваются, и соответственно, таяние снега на этих склонах происходит значительно быстрее. Обычно на южных склонах снеготаяние проходит более интенсивно, и там впитывается от 30 до 80% талых вод; на северных склонах впитываются почти все 100% зимних осадков. А быстрое таяние снега – причина весенней водной эрозии. Соответственно это может приводить к большей эродированности южных склонов. В то же время, интенсивность биологических процессов на южных склонах выше, интенсивнее происходит накопление гумуса и других структурообразующих веществ, что приводит к улучшению водопроницаемости на этих склонах. И нередко оказывается, что этот фактор, - улучшение водопроницаемости и влагоемкости почв на южных склонах становится доминирующим. Вследствие этого южные склоны нередко содержат даже несколько больше влаги, чем северные. Получается, что в зависимости от природной зоны, от почвенных условий и от фактора, который находится в данном случае в минимуме, который определяет в большей степени продуктивность, экспозиция склона может действовать по-разному. Соответственно, меняются и подходы к обработке, к срокам сева и другим агромероприятиям. Иногда бывает затруднительно определить перераспределение водо- и энергоресурсов на склонах южной и северной экспозиций. Но всегда следует иметь в виду многофакторность последствий этого перераспределения: сказывается и ветровой режим, и крутизна склона, и изменение почв под действием поверхностных стоков, другие факторы и постараться выделить среди них главенствующие в данных условиях.

Следует отметить, что наклон склона с востока на запад или с запада на восток сказывается лишь на ходе суточной кривой температур, повышая соответственно, утренние или вечерние температуры, иногда влияя на экстремальные значения, но, не влияя на среднюю температуру. В большинстве случаев эти склоны по агроклиматическим показателям отличаются мало при прочих равных условиях.

Таким образом, ориентировка (экспозиция) склона является одним из основных факторов, определяющих распределение поступающей радиации, а за этим, и накопление почвенной влаги, испарение и другие агроклиматические явления. При этом эти особенности проявляются в специфике рельефа, ветрового режима в данном рельефе, которые проявляются различно в зависимости от природно-климатической зоны.

## **Физические основы некоторых метеорологических явлений**

### **Засуха**

Это длительный период с осадками ниже нормы при повышенных температурах воздуха. Различают несколько типов засух: атмосферную (воздушную) почвенную и физиологическую. Атмосферная является следствием длительного периода без осадков при высокой температуре и низкой влажности воздуха. Почвенная - следствие понижения доступности влаги по причине предшествующего периода повышенной эвапотранспирации. Физиологическая засуха наступает тогда, когда растение неспособно потреблять влагу из почвы, хотя запасы ее в почве удовлетворительные. Последняя случается тогда, когда корневая система растений повреждена (при пересадке растений, рассады).

Основной причиной формирования засух на территории Русской равнины является вторжение холодных воздушных масс с севера или северо-запада и формирование вслед за этим холодным фронтом мощного антициклона. По мере продвижения к югу северный холодный воздух прогревается и теряет большую часть своей влаги. И.Е.Бучинский приводит такие расчеты, доказывающие значительное иссушение воздуха при засухе. Холодный северный воздух, внедряясь на Русскую равнину, при 0°С содержит в 1 м<sup>3</sup> не более 4.9 г влаги. Двигаясь на юг воздух прогревается, например до 20 °С. При той температуре воздух может содержать уже 17.3 г влаги. Однако содержит он только те самые 4.9 г. Возникает дефицит влаги, воздух содержит только 28% от максимального насыщения. Это очень сухой воздух. Возникает атмосферная засуха. Так как антициклоны движутся очень медленно, то температура воздуха возрастает, что еще больше усиливает засуху. Она становится продолжительной и угрожающей. Так формируются длительные, устойчивые катастрофические засухи на Русской равнине и южнее.

### **Суховеи**

Под суховеем понимают сухой и знойный ветер, нарушающий водный баланс растений, когда расход влаги растением значительно превышает ее потребление. Суховеи являются определенным сочетанием метеорологических элементов, при котором относительная влажность воздуха составляет менее 30%, температура воздуха не менее 25 °С, а скорость ветра на высоте флюгера 5 м/с и более.

Суховеи зарождаются в районах Атлантики и северных морей (Карское, Баренцево, Норвежское, Северное моря). Зародившие здесь холодные массы движутся над Казахстаном, Средней Азией, Прикаспием и становятся очень сухими. Влажность воздуха стремительно снижается. Как правило, основное движение потоков воздуха при суховеях – восходящее, однако за счет турбулентного обмена более сухой воздух верхних слоев поступает в нижние приземные слои. Непременным условием при этом является антициклон. При таком сочетании условий (антициклон, очень сухой прогретый воздух верхних слоев, интенсивный турбулентный обмен) горячий и сухой воздух опускается в нижние слои и приводит к суховею.

Таким образом, возникновение суховеев и засух обуславливается вторжением северных холодных масс воздуха, их иссушением и нагреванием при движении на юг, сопровождающимся мощными циркуляционными процессами (антициклоном и активным турбулентным обменом), которые захватывают большую толщу атмосферы.

## **Измерение метеопараметров**

В данном разделе кратко остановимся на определениях основных метеопараметров.

### **Оценка элементов радиационного баланса (актинометрические наблюдения)**

Величины, характеризующие радиационный баланс, а именно прямую, рассеянную радиации лучше всего определять экспериментально, хотя существует большое количество формул, связывающих излучение с количеством облаков, содержанием водяного пара, средней продолжительностью солнечного сияния и другими характеристиками атмосферы. Эти формулы изложены, в частности в книгах Слейтера и Макилроя (1964) и др., но, как правило, все они имеют локальный характер и должны быть тщательно проверены при собственных экспериментальных наблюдениях.

Кратко укажем принципы определения потоков прямой и рассеянной радиаций. Прямую солнечную радиацию измеряют *актинометрами* и *пиргелиометрами*, рассеянную - с помощью *пиранометров* различных конструкций. Принципы работы этих приборов основаны на том, что на принимающей радиацию поверхности имеются участки абсолютно черного тела (поглощающего все солнечные лучи) и белые, их отражающие. Как видно на рис. II.2.6, эти участки чередуются. К каждому из участков подведен конец дифференциальной термопары. За счет разности нагрева белых и черных участков в цепи

возникает ток, который измеряют микроамперметром. Ток будет тем больше, чем больше разность температур черной и светлой поверхностей, которая, в свою очередь, будет определяться интенсивностью прямой или рассеянной солнечной радиации.

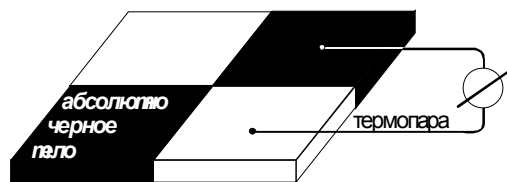


Рис. П.2.6. Схема устройства пиранометра

Вполне понятно, что каждый прибор необходимо тарировать в контролируемых, стандартных световых условиях, для того чтобы потом пересчитать величину силы тока в соответствующий радиационный поток.

Порядок величин прямой солнечной радиации у земной поверхности в полдень: 1.0-1.5 кал/см<sup>2</sup> мин, рассеянной в условиях ясного неба – 0.1-0.01 кал/см<sup>2</sup> мин, а для облачного неба – около 1 кал/см<sup>2</sup> мин.

### Об измерении скорости ветра

Скорость ветра измеряется обычно с помощью *анеометров чашечного типа*. Скорость вращения оси с чашечками считается пропорциональной скорости ветра, что проверяется тщательно тарировкой. По количеству оборотов чашечного анеометра легко рассчитать (или использовать соответствующие таблицы, номограммы) скорость ветра. Следует лишь отметить, что при малых скоростях ветра чашечные анеометры характеризуются нелинейностью зависимости скорости вращения от скорости ветра, что требует дополнительной тарировки.

### Измерение влажности воздуха

Наиболее распространенным методом измерения является психрометрический. Суть метода состоит в том, параллельно снимаются показания с двух термометров: один (сухой) показывает температуру воздуха, другой (смоченный), емкость с измерительной жидкостью (например, ртутью) которого, находится в смоченной водой тряпочке, - дает более низкие показания температуры за счет охлаждающего эффекта испарения влаги из смоченной тряпочки. Разность температур носит название психрометрической разности. Чем больше эта разность, тем суше воздух. С помощью специальных номограмм и психрометрических таблиц по психрометрической разности, средней температуре, давлению определяют влажность воздуха.

Чаще всего для полевых метеонаблюдения используют *психрометр Ассмана*, который представляет собой две трубки с сухим и влажным термометрами, но для большей репрезентативности, для исключения случаев застоя воздуха, через трубки вентилируется воздух с постоянной небольшой скоростью. При полевых наблюдениях важно поддерживать постоянную равномерную скорость вентиляции.

### Литература

- То о м и н г Х. Т. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат. 1977  
 То о м и н г Х. Т. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Л.: Гидрометеиздат. 1984.  
 Шу ль г и н А. М. Агрометеорология и агроклиматология. Л.: Гидрометеиздат. 1978.  
 Бу ч и н с к и й И. Е. Засухи и суховеи. Л.: Гидрометеиздат. 1976.  
 С л е й ч е р Р., Ма к и л р о й И. Практическая микроклиматология. М.: Изд-во «Прогресс». 1964.

### Глава II.3. Температура почвы и её значение для растений

Этот вопрос чрезвычайно важен в двух аспектах: в аспекте прорастания семян и в аспекте роста и развития растений в вегетационный период.

#### Температура почвы в периоды прорастания семян и роста растений

Температура почвы оказывает существенное влияние на начальном периоде жизни растений: в период всходов и кущения. Во время всходов почва должна быть достаточно прогрета, прогрета до так называемых «критических» температур прорастания (по И.Б.Ревуту). Если температура почвы ниже «критической» семена не прорастают, а просто загнивают в холодной почве. Если выше – прорастают быстрее. Так, озимая пшеница прорастает при температуре почвы 5°C за 6 дней, при 10°C – за 4 дня, а при 15-20°C – всего за 1-2 дня. Последний диапазон температур – близок к оптимуму, так повышение температуры почвы до 35-40°C уже приводит к замедлению процесса прорастания.

Вполне понятно, что для каждого растения есть своя сложившаяся эволюционно «критическая» температура и температура появления всходов. В табл. II.3.1 приведены «критические» температуры прорастания и появления всходов для различных растений.

Таблица II.3.1.

«Критические» температуры прорастания семян и появления всходов (по А.М.Шульгину, 1972)

Культура	Прорастание семян	Появление всходов
Конопля, горчица, клевер, люцерна	0–1	2–3
Рожь, пшеница, ячмень, озимая рожь, горох, чечевица, чина	1–2	2–3
Лен, гречиха, люпин, нут, свекла	3–4	6–7
Подсолнечник, перилла, картофель	5–6	8–10
Кукуруза, просо, суданская трава, соя	8–10	10–11
Фасоль, сорго, клещевина	10–12	12–13
Хлопчатник, арахис, кунжут, рис	12–14	14–15

Аналогично, температура почвы оказывает влияние и на продолжительность межфазных периодов (второй аспект). Пониженные температуры почвы (ниже 10°C) замедляют не только появление всходов, но и увеличивают длину вегетационного периода и фаз развития (табл. II.3.2).

Таблица II.3.2

Продолжительность межфазных периодов (сутки) у пшеницы при различных температурах почвы (по А.М.Шульгину, 1972)

Температура почвы	Межфазные периоды пшеницы						Длина вегета ц. Перио да
	Посев –всход ы	Всход ы –3-й лист	3-й лист – трубк а	Трубка – Колош е-ние	Колоше – молочна я спелост	Молочна я спелость – воскован	

	ь				ие		
15–20	5	13	10	20	17	13	78
12–14	6	15	10	19	17	14	81
8–10	9	20	14	20	22	21	106
6–7	11	23	14	20	32	24	124

Из приведенной таблицы следует два очень важных вывода:

1. Удлинение периода вегетации при снижении температуры почвы происходит в первые и последние фазы развития. Холодная температура почвы оказывает неблагоприятное воздействие, и в стадии колошения–молочная спелось. Но, (что очень важно!) лишь при наличии предыдущего холодного периода. Это приводит ко второму выводу.

2. Наибольшее влияние оказывает температура почвы в период от посева до выхода в трубку. Если выращивать растения до этой фазы при оптимальной температуре (15–20°C), а затем, после фазы выхода в трубку, уже при 6–7°C, то, оказывается, длина вегетационного периода остается почти без изменений. Следовательно, особое значение оказывает температура почвы именно в первые три стадии развития.

Следует отметить, что температура почвы оказывает влияние и на результирующую продукцию. Причем неоднозначно. Если урожай репродуктивных органов снижается, то общая масса соломы и корней может увеличиваться. Это хорошо видно из следующей таблицы (табл.П.3.3).

Таблица П.3.3

Влияние температуры почвы на структуру урожая пшеницы (по А.М.Шульгину, 1972)

Температура почвы	Число колосков	Число цветков в колоске	Озерненность	Зерно	Солома (%)	Корни
15–20	14.3	47.8	22.6	42	47	11
12–14	14.0	48.6	21.2	37	44	19
8–10	13.8	31.9	12.1	32	47	21
6–7	11.7	21.9	12.1	25	45	30

Из этой таблицы следует, что пониженная температура почвы резко снижает формирование репродуктивных органов, напротив, стимулирует развитие корней растений. Причина этого будет подробно обсуждена в Главе III при ознакомлении с гипотезами соотношения побег-корень (Глава III.5. «Рост, развитие и формирование продуктивности»). В целом же можно сказать, что снижение температуры почвы замедляет поглотительную способность корней, в особенности биофильных элементов, таких как фосфор. И, несмотря на то, что растение пытается увеличить потребление этих элементов за счет предпочтительного роста корней, роста даже в ущерб росту и развитию других органов, все же репродуктивные органы страдают более всего от пониженной температуры почвы.

*Определение*

Отрицательное влияние пониженных температур почвы сказывается в  
- увеличении продолжительности вегетационного периода;

- увеличении продолжительности первых трех фаз развития (от посева до выхода в трубку) в сравнении с последующими фазами развития зерновых;
- увеличении биомассы корней при снижении массы побега и, в особенности, репродуктивных органов.

Как видно из приведенных таблиц физиологически активные температуры почвы также, как и воздуха, составляют в среднем величины  $>10^{\circ}\text{C}$ . Это позволяет к почвенным термическим условиям применять те же показатели, которые используют в метеорологии и климатологии. А именно, - *сумму активных температур почвы*. Кроме того, и специфические для температурного режима, - температуру на глубине распространения корневой системы (как правило, на 20 см) и соотношения температур припочвенного слоя воздуха (или поверхности почвы) и почвы на глубине 20 см.

Сумма активных температур почвы изменяется в зависимости от природной зоны. В самом общем случае, суммы активных температур почвы меньше воздуха на  $200-300^{\circ}$  на севере и равны в южно-таежной и лесной зонах, а в степной зоне сумма почвенных активных температур выше активных температур воздуха на те же  $200-300^{\circ}$ . Однако следует учитывать, что это общие положения. Следует учитывать и континентальность климата. Например, в Восточной Сибири сумма активных температур почвы ниже, в Западной выше, чем сумма активных температур воздуха. Оказывает влияние и тип водного режима почв, ее гранулометрический состав и другие почвенные факторы, определяющие теплопроводность и теплоемкость почвы (см. Главу I.4. «Теплофизические свойства почв»).

### **Зимние температуры почвы**

На температурные условия произрастания растений существенное влияние оказывает температура зимой. Считается, что снижение температуры почвы до  $-9 - -20^{\circ}\text{C}$  (критические зимние температуры) на глубине 3-5 см (глубина расположения узла кущения большинства сельскохозяйственных растений) приводит к их вымерзанию. Главное для оценки зимних температур почвы – это учет температуры воздуха и высоты снежного покрова. Безусловно, охлаждение почвы, выделение ею тепла в окружающее пространство подчиняется тем же законам, что и нагревание почвы. Поэтому, если почва освобождена от снега ее охлаждение будет зависеть от теплофизических свойств почв с учетом происходящих фазовых изменений воды и выделения теплоты замерзания при превращении воды в лед. Особое значение имеет снежный покров, его характеристики, основного «одеяла» почвы и хранящихся в ней семян и зимующих растений.

Влияние снега на почву, ее температуру изучал одним из первых основатель метеорологической науки в России А.И.Воейков (см. «*К вопросу о...*»). Он сформулировал несколько положений, являющихся ведущими для оценки влияния снежного покрова на температуру почвы. Эти положения следующие:

1. Снег – теплоизолятор, он предохраняет почву от охлаждения. Это правило действует в том случае, если температура воздуха и поверхности снега менее  $0^{\circ}$ .
2. При температуре воздуха выше нуля влияние снега на температуру почвы обратное. Снег оказывает охлаждающее влияние и в процессе снеготаяния, когда через почву проникают холодные фильтрационные воды после снеготаяния.
3. В тепловом балансе «согревающее» действие снега превосходит «охлаждающее» его действие.
4. Снег снижает абсолютные минимальные температуры почвы и уменьшает колебания температур.
5. Чем рыхлее снег, тем сильнее его теплоизолирующее действие.

Физическое объяснение первого положения связано с чрезвычайно низкой теплопроводностью снега. В обычных условиях при плотности снега около 0.3

теплопроводность снега составляет 0.0006 кал/см с °С . Заметьте! – теплопроводность влажной глинистой почвы достигает величин около 0.003 кал/см с °С (см. Главу I.4. «Теплофизические свойства почв»), т.е. выше в 5 раз.

*К вопросу о...*

Воейков Александр Иванович (1842— 1916)

В каждой науке можно выделить ее основателя, или уж во всяком случае, основоположника национальной школы, научных традиций. Для отечественной климатологии – это, безусловно, Александр Иванович Воейков. Поступив в 1860 г. на физмат Петербургского университета, уже через год, когда университет был закрыт в связи со студенческими волнениями, он уехал учиться в Германию, где получил степень доктора философии в Гёттингенском университете (1865), защитив диссертацию «О прямой инсоляции в различных местах земной поверхности». А вот дальнейшие его исследования связаны с Россией. Наибольшее значение имеет капитальный труд «Климаты земного шара, в особенности России». В этом труде и в его последующих работах сказалась, видимо, его тяга к математике (не зря ведь поступал и начинал учиться на физико-математическом факультете). Он впервые при описании многих климатических и географических явлений применил балансовый метод, пытался вскрыть физическую сущность природных процессов. Много сил и энергии Воейков уделил научному объяснению явлений засухи, как и многие великие российские естествоиспытатели той эпохи (вспомним великого основателя почвенной науки Василия Васильевича Докучаева). А.И.Воейков писал о причинах неурожая, которые связаны не характером дождя, а с тем, что «на юге выпадает не столько дождя, сколько было бы нужно при таком теплом лете» («Засуха 1885 г»). Он разрабатывал климатические основы мелиорации земель, методы повышения урожайности сельскохозяйственных культур, научные основы их районирования. Во всех учебниках, словарях по метеорологии и климатологии можно найти широкоизвестный закон Воейкова: «Суточная амплитуда температуры в ясные дни будет значительно больше в долинах, чем на соседних холмах и склонах». Этот закон нередко используется в более общем виде – суточная динамика температуры в вогнутых формах рельефа больше, чем на выпуклых. Для агрофизики этот закон чрезвычайно важен, так как определяет особенности перераспределения тепла в различных элементах рельефа. Имя А. И. Воейкова носит Главная геофизическая обсерватория России.

Также вполне понятны и физические закономерности, лежащие в основе пятого положения. В метеорологии принято, что плотность снега – величина безразмерная, она измеряется как отношение объема воды, полученной из снега, к взятому объему снега (хотя в этом случае, при плотности воды близкой к 1 г/см<sup>3</sup>, вполне применима и традиционная физическая размерность плотности – г/см<sup>3</sup>). Например, если взято 100 см<sup>3</sup> снега и из него удалось вытопить 10 см<sup>3</sup> воды, то плотность снега равна 0.1. Плотность снежного покрова колеблется в широких пределах – от 0.04 до 0.7. Эта плотность зависит от условий выпадения снега: он будет рыхлее в случае выпадения при отрицательных температурах воздуха. Повышенные температуры во время снегопада приводят к уплотнению снежного покрова. А при пропитанном водой или обледевшим снегом его теплоизолирующее действие весьма мало. Предложена квадратичная зависимость теплопроводности от плотности снега:

$$I = 0.0067 r_{sn}^2,$$

где  $I$  - удельная теплопроводность, кал/см с °С,  $r_{sn}$  – плотность снега, [безразмерная величина].

В отношении третьего положения следует иметь в виду не только низкую теплопроводность снега, но и его высокую отражательную способность. Именно благодаря высокой отражательной способности снега, он долгое время остается рыхлым, а, следовательно, и хорошим термоизолятором.

Учитывая термоизолирующие свойства снежного покрова, предложен ряд коэффициентов, характеризующих температурный режим в зимних условиях.

1. Снежно-температурный коэффициент Рихтера:

$$K = \frac{10T}{h},$$

где  $T$  – средняя температура воздуха,  $h$  – средняя высота снежного покрова за период со снежным покровом выше 1 см.

2. Показатель суровости зимы по А.М.Шульгину



$$K = \frac{T_m}{C},$$

где  $T_m$  – средняя из абсолютных минимумов температура воздуха за месяц и в среднем за зимние месяцы,  $C$  – высота снежного покрова.

Как видно из приведенных формул коэффициентов, отражающих условия перезимовки растений, оба они включают температуру воздуха, нормированную высотой снежного покрова. Однако если коэффициент Рихтера характеризует в среднем зимние условия, то коэффициент Шульгина именно суровость зимы: в нем учитываются минимальные, а не срочные (т.е. определяемые в определенные сроки) значения температур. В любом случае, комбинации температуры воздуха зимой и высоты снежного покрова довольно четко характеризуют условия суровости зимнего периода.

### Перезимовка растений

Другое явление, связанное с перезимовкой растений – это явление *выпревания посевов*.

В связи с особенностями формирования снежного покрова, зимними температурами, образованием ледяных корок и затоплением во время оттепелей происходит частичная гибель растений, изреженность посевов – их выпревание. Обычно считают, что если 10% посевов изрежена вследствие неблагоприятных зимних условий – это небольшая изреженность, от 10 до 30% – значительной. А от 30 до 50% – большой. При выпадении более 50% посевов – это хозяйственная гибель посевов.

Соответственно величине снежного покрова и средней минимальной температуры почвы оцениваются и условия перезимовки в баллах от 1 (очень плохая) до 5 (очень хорошая). В этом случае учитываются условия выпревания озимых, как наиболее опасные в зимний период. Эти оценочные градации и прогнозные значения изреженности и количества стеблей весной после перезимовки представлены в таблице II.3.4.

Таблица II.3.4.

Оценка условий перезимовки озимых культур под снежным покровом более 30см					
Баллы	Оценка условий перезимовка	Число декад со снежным покровом >30 см	Средняя минимальная температура почвы (°C)	Изреженность посевов весной (%)	Количество стеблей весной (% от их количества осенью)
1	Очень плохая	15	0 ÷ -1	50	40
2	Плохая	11-14	-2 ÷ -4	30-50	40-60
3	Удовлетворительная	6-10	-5 ÷ -6	10-30	50-110
4	Хорошая	1-5	-7 ÷ -8	5-10	110-130
5	Очень хорошая	0	-9 ÷ -10	0-5	130

Заметим, что для характеристики выпревания растений особенно важны не только толщина снежного покрова, но и наличие отрицательной температуры в поверхностных слоях почвы, которая гарантирует отсутствие периодов оттаивания, переувлажнения верхнего слоя и, соответственно, выпревания озимых культур. Вполне понятно, что вымерзание посевов и их выпревание – две неблагоприятные «крайности» зимнего температурного режима: при вымерзании опасны низкие температуры в поверхностных слоях почвы, а при выпревании – напротив, высокие температуры при наличии снежного покрова, который, подтаивая, сохранит переувлажнение верхнего слоя.

*Определение*

Промерзание почвы ниже критических температур ( $-9 \div -15^{\circ}\text{C}$ ) на глубине расположения узла кущения (3-5 см) ведет к их сильным повреждениям или даже гибели растений – к **вымерзанию**. Условия промерзания характеризуются отношениями температуры воздуха (среднесрочными или минимальными) к высоте снежного покрова: чем выше величина этого показателя, тем больше вероятность вымерзания.

**Выпревание** – изреженность посева вследствие зимнего повышения температуры, периодов поверхностного затопления. Условия выпревания складываются при температурах близких к 0 и высоким (>30 см) снежным покровом.

**Классификация тепловых условий почвы**

Указанные показатели теплового режима почв, – температура на глубине распространения корневой системы (как правило, на 20 см) и соотношение температур припочвенного слоя воздуха (или поверхности почвы) и почвы на глубине 20 см, позволили классифицировать тепловые почвенные условия.

Одну из первых научных классификаций теплового режима почв предложил А.И.Воейков. Он выделил три типа термического режима в соответствии с процессами охлаждения и нагревания, т.е. в связи с соотношением температур воздуха и почвы:

1. Тип нагревания или солнечный.
2. Тип охлаждения или лучеиспускания.
3. Тип равномерного распределения тепла.

Впоследствии, используя принцип соотношения температур приземного воздуха и почвы, предложен «термический показатель»,  $H$ ,

$$H = \frac{\sum T > 10^{\circ} \text{ почвы}}{\sum T > 10^{\circ} \text{ воздуха}},$$

Физический смысл предложенного термического показателя состоит в том, что он указывает направление потоков тепла в системе почва – приземный слой воздуха. Если  $H$  будет больше 1, то почва будет выделять тепло, а если меньше – она будет прогреваться. На этой основе и было выделено три типа тепловых режимов, аналогичных предложенных А.И.Воейковым:

- тип излучения,  $H \gg 1$ ;
- тип неустойчивого равновесия,  $H \approx 1$ ;
- тип инсоляции,  $H < 1$ .

Подтипы было предложено выделять по признаку континентальности. Континентальность характеризовалась разностью температур в контрастные сезоны (зима–лето) на глубине 20 см. Выделяют три подтипа:

- умеренный, когда разность температур на 20 см составляет  $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$ ;
- континентальный: сезонная амплитуда температур  $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ ;
- резко континентальный:  $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$ .

Вполне понятно, что приведенная классификация – весьма общая, для больших территорий. Она имеет, прежде всего, генетическую направленность, как и классификация водных режимов почв.

Более подробная и хорошо запоминающаяся классификация была предложена А.М.Шульгиным (1972), который в основу положил среднюю температуру почвы на глубине 20 см за теплый период года. Тогда удается выделить пять типов режимов:

1. Холодный – средние температуры на глубине 20 см находятся в диапазоне от 0 до  $5^{\circ}\text{C}$ .
2. Умеренно теплый – от 5 до  $10^{\circ}\text{C}$ .
3. Теплый – от 10 до  $15^{\circ}$ .

4. Весьма теплый – от 15-20°C
5. Жаркий – свыше 20°C.

### Прогноз температуры почвы

Конечно, агрофизикам важно знать наступление «критических» температур и суммы активных температур почвы для того, чтобы анализировать и управлять продукционным процессом. Поэтому чрезвычайно значение имеет предсказание температуры почвы.

*Регрессионная модель.* Одна из первых попыток такого рода прогноза связана с нахождением соотношения температуры воздуха и почвы. В целом для Европейской территории России температура почвы выше, чем температура воздуха на 1°, хотя на северо-востоке эта разница достигает 3-3.5°. Однако этот подход является общим. Действительно, температура почвы является результатом не только прогревания воздуха над ее поверхностью, но и влажности почвы, характеристик ее поверхности (прежде всего ее цвета, от которого зависит альбедо), гранулометрического состава. Поэтому соотношения температур почва-воздух является неустойчивым, существенно зависящим от климатической зоны, от континентальности климата, указанных особенностей почв и многих других факторов. Этот метод предсказания дает лишь ориентировочные прогнозы.

Для физически обоснованных расчетов температуры почвы по ее слоям, т.е. температурного режима почв, используется основное уравнение теплопереноса. Напомним (см. Главу I.4), что *основное уравнение теплопереноса* – уравнение, связывающее изменения температуры во времени с изменением температуры по расстоянию. Для динамики температуры это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad - \text{основное уравнение теплопереноса, связывающее изменение}$$

температуры почвы ( $\partial T$ ) во времени ( $\partial t$ ) с изменением температуры по расстоянию в направлении градиента (в приведенном написании, - по вертикали ( $\partial z$ )) через коэффициент температуропроводности,  $k$ , (см).

Это основное уравнение используется и для полуэмпирических (имитационных) моделей переноса тепла, и для аналитических моделей. Рассмотрим оба эти типа моделей для случая прогноза теплового режима почв.

*Имитационная (физически обоснованная) модель.* Предположим, что в начальный момент времени ( $j$ -й) мы имеем распределение температуры в трех слоях почвы (см. табл. II.3.5)

Табл. II.3.5

Пояснение к схеме расчета температуры  $i$ -ого слоя в  $(j+1)$ -ый момент времени по распределению температуры в слоях  $(i-1)$ ,  $i$ ,  $(i+1)$  в предыдущий  $j$ -ый момент времени

Время ( $j$ ) Слои ( $i$ )	$j$	$j+1$
$i-1$	$T_{i-1}^j$	
$i$	$T_i^j$	Требуется узнать $T_i^{j+1}$ ?
$i+1$	$T_{i+1}^j$	

--	--	--

Необходимо узнать температуру почвы в  $(j+1)$ -й момент времени, исходя из распределения температуры по слоям в  $(j)$ -й момент времени, если расстояние между слоями равно  $Dz$ .

Имитационная модель, которая рассчитывает по очень маленьким промежуткам температуру в следующий момент времени по температуре в настоящий момент и с использованием теплофизических функций на основе линейных (или иного типа)

упрощений, использует основное уравнение теплопереноса:  $\frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ . Если перейти к

конечным разностям и учитывать обозначение слоев и времени, можно записать

$$\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = k \cdot \frac{(T_{i-1}^j - T_i^j) - (T_i^j - T_{i+1}^j)}{(\Delta z)^2} = k \cdot \frac{T_{i-1}^j - 2T_i^j + T_{i+1}^j}{(\Delta z)^2}$$

или

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{k\Delta t}{(\Delta z)^2} \cdot (T_{i-1}^j - 2T_i^j + T_{i+1}^j)$$

Вот это уравнение может служить основой для расчета искомой величины температуры в  $i$ -ом слое в следующий момент времени  $(j+1)$  по температуре в слоях почвы  $(i-1)$ ,  $i$  и  $(i+1)$  но в данный,  $j$ -й, момент времени. А это и есть прогнозирование температуры почвы. Надо только знать распределение температуры в данный момент (начальное распределение температуры почвы), теплофизические функции (в данном случае – температуропроводность  $k$ ), а также знать количество поступающей энергии в верхний слой и её количество, исходящее из нижнего (это условия на нижней границе). Это позволяет моделировать температурный режим почвы. На ЭВМ с помощью специальных программ это традиционная задача агрофизики. Подчеркнем: надо только знать условия на верхней и нижней границах, начальное, в данный момент послойное распределение температуры и теплофизических функций, прежде всего  $k$ . Именно функцию температуропроводности, так как она,  $k$ , как мы знаем, зависит от влажности:  $k = f(W)$ .

Иногда, в продолжение решения указанной имитационной модели делают еще и следующее упрощающее допущение. Предположим, что величина  $\frac{k\Delta t}{(\Delta z)^2} \cong 0.5$ . Тогда

вышеприведенное уравнение будет выглядеть

$T_i^{j+1} = T_i^j + 0.5(T_{i-1}^j - 2T_i^j + T_{i+1}^j)$  или  $T_i^{j+1} = 0.5(T_{i-1}^j + T_{i+1}^j)$ . Таким образом, исходя из последнего уравнения, искомая величина  $T_i^{j+1}$ , т.е. температура  $i$ -ого слоя в следующий момент времени, может быть рассчитана из температуры выше- и нижележащего слоев в данный,  $j$ -ый момент времени. Таким образом, мы можем предсказать температуру в некотором слое почвы в будущем, исходя из распределения температуры в настоящий момент. Это и есть «предсказательная сила» основного уравнения теплопереноса, которая используется в имитационных моделях.

Впрочем, не следует забывать, что мы внесли упрощающее допущение  $k \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \cong 0.5$ .

И если исходить из характерных величин температуропроводности для суглинистых почв (подробнее о них, напомним, в Главе I.4), находящихся в диапазоне 480-490 см<sup>2</sup>/сут, расчет вести для 10-см слоев и промежутков времени принять 0.1 суткам (144 мин), то мы

как раз и получим величину  $\frac{k\Delta t}{(\Delta z)^2}$ , близкую к 0.5. Указанное уравнение оказывается

справедливым для определенного промежутка времени, расстояния по вертикали и значения температуропроводности. С его помощью можно прогнозировать изменение

температуры в почвенных слоях, исходя из распределения в настоящий момент, учитывая введенное выше упрощающее допущение и то, что в слои не поступает, и из них не потребляется дополнительного количества тепла. В более сложных моделях учитывается и поступающая на верхней границе и исходящая с нижней границы почвы энергия, т.е. условия на верхней и нижней границах расчетной почвенной толщи, а также зависимость температуропроводности от влажности и ее изменение по почвенному профилю.

*Аналитическая модель.* В агрофизике нередко пользуются и аналитическими моделями для предсказания температуры по слоям почвы. Подчеркнем, что аналитические модели, т.е. модели, использующие аналитические решения без применения способа численных упрощений (как в случае имитационных моделей), оговаривают условие поступление энергии на верхней границе в виде конкретной формулы. Без этой формулы невозможно аналитическое решение. Такого рода формула может быть близка и к некоторым природным условиям, и искусственным условиям в теплицах. Примером такой формулы на верхней границе является динамика температуры на поверхности почвы, выраженная синусоидальным законом. В этом случае удастся рассчитать динамику температуру на глубине  $z$ , но также с использованием данных о коэффициенте температуропроводности и некоторых других параметрах.

Например, на рис.П.3.1 представлена синусоидальная динамика температуры почвы на поверхности, характеризующая ее средним значением,  $T_{cp}$ , амплитудой  $A_0$ .

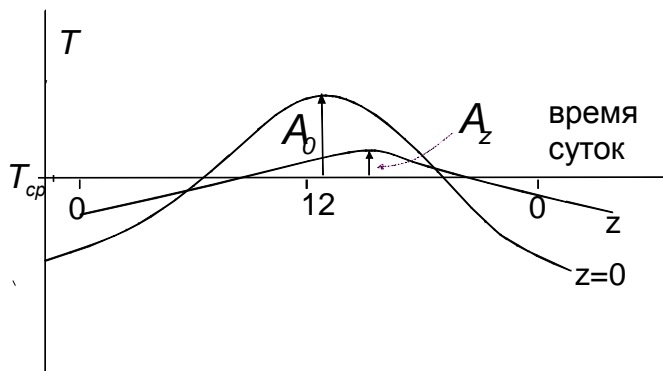


Рис.П.3.1. Синусоидальное изменение температуры на поверхности почвы ( $z=0$ ) и на некоторой глубине  $z$ .

Тогда изменение температуры на поверхности во времени  $T(0,t)$ , будет следующим образом зависеть от средней температуры, амплитуды ( $A_0$ ) и частоты ( $\omega$ ):

$$T(0,t) = T_{cp} + A_0 \sin \omega t.$$

На глубине  $z$  динамика температуры будет отличаться от температуры на поверхности лишь амплитудой ( $A_z$ ) и некоторым сдвигом по фазе,  $f(z)$ :

$$T(z,t) = T_{cp} + A_z \sin[\omega t + f(z)].$$

Если в это уравнение динамики температуры на глубине  $z$  ввести основное уравнение теплопереноса ( $\frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ ), то можно получить следующее выражение для динамики температуры на глубине  $z$ :

$$T(z,t) = T_{cp} + A_0 \left[ \sin \left( \omega t - \frac{z}{d} \right) \right] e^{-z/d},$$

где  $d = \sqrt{\frac{2k}{w}}$ . Из этого уравнения становится очевидным, что на любой глубине амплитуда температуры  $A_z$  меньше амплитуды температуры на поверхности почвы  $A_0$  в  $(e^{z/d})$  раз, а также наблюдается сдвиг тепловой волны на величину  $(\frac{z}{d})$ . Таким образом, появляется возможность рассчитать динамику температуры на любой глубине по средней температуре и амплитуде температуры на поверхности почвы и по температуропроводности почвы.

Отметим, что рассчитать можно аналитически, т.е. в любой момент времени, а не как в вышеприведенном случае с имитационной моделью, когда считать было необходимо по отдельным промежуткам времени, да еще все время усредняя (интерполируя) значения температуропроводности по слоям. Это преимущества аналитических моделей. Но следует отметить еще раз условия, в которых они применимы:

1. На верхней границе почвы задано уравнение (в данном случае, синусоидальное) динамики температуры. Вообще-то в природе условия на верхней границе редко бывают четко описываемыми какими-либо уравнениями. Поступление тепла на поверхность почвы весьма изменчиво в течение суток. Подобное уравнение можно соблюдать только в условиях закрытого грунта.

2. И в аналитических моделях необходимо вводить экспериментально определяемые величины теплофизических свойств. В данном случае – температуропроводность. Более того, она вводится в данном случае как одинаковая по всей глубине рассмотрения (от 0 до  $z$ ). Это тоже допущение неприменимое для почв с их различающимися свойствами по почвенным горизонтам, с некоторым распределением влажности по профилю почвы (а ведь  $k$  зависит от влажности почвы!). Это также может быть применено лишь для условий тепличного грунта.

Учитывая эти два основных допущения, обычно для естественных условий отдают предпочтение имитационным моделям, а вот для условий теплиц, контролируемых условий закрытого грунта можно использовать и аналитические модели для прогноза и оптимизации температурного режима почв и грунтов. Одним из основоположников имитационного и аналитического моделирования был Сергей Владимирович Нерпин, который длительное время возглавлял Агрофизический институт в Ленинграде, где и создал школу математического моделирования в агрофизике (см. «К вопросу о...»)

«К вопросу о...»

Нерпин Сергей Владимирович (1915-1992)

Агрофизика стала отдельной самостоятельной научной дисциплиной, со своими теоретическими и методическими принципами управления тепло-влаго-солевым режимом сельскохозяйственных полей во многом благодаря работам Сергея Владимировича Нерпина. Начало трудовой деятельности С.В.Нерпина связано с гидрологией и гидротехникой: в 1935 г. он окончил Ленинградский гидротехнический техникум по специальности техник-гидротехник, затем работал на строительстве канала Москва-Волга, а затем, одновременно с учебой в Ленинградском институте инженеров водного транспорта, работал в Государственном гидрологическом институте старшим научным сотрудником, в послевоенные годы – главным инженером на восстановлении Беломоро-Балтийского канала. И его кандидатская диссертация, защищенная в 1950 г. и названная «Исследование некоторых вопросов гидротехники с учетом роли молекулярных сил», и докторская (1957) «Гидромеханика тонких слоев», дали начало новому научному направлению в механике жидкостей – почвенной гидромеханике.

Имя С.В.Нерпина связано с Ленинградским агрофизическим институтом. После смерти А.Ф.Иоффе, с февраля 1961 г. С.В.Нерпин возглавлял этот ведущий в стране в области агрофизики институт в течение 14 лет. Сергей Владимирович был одним из первых, предложивших математические модели движения почвенной влаги, набухания грунтов, их ползучести, процессов мерзлотного пучения. Полагаю, что в 50-60-е годы прошлого века еще достаточно скептически относились к физике и математике в сельском хозяйстве. Но Сергей Владимирович уже в те годы реально представлял значение математических моделей, как средств оптимизации и управления сельскохозяйственным производством. Доказательством тому служат его

многочисленные работы по влагообмену на сельскохозяйственном поле с агрометеорологическим и биологическим блоками, а также его монографии: «Физика почв», «Энерго- и массообмен в системе почва-растение-воздух», «Моделирование продуктивности агроэкосистем», многие положения из которых приводятся в данном учебнике как классические. Это сейчас мы обязательно при разработке того или иного проекта использования и охране природных ресурсов просчитываем разнообразные варианты с помощью математических моделей, на их основе выбираем наилучший вариант, прогнозируем возможные последствия. Это сейчас математические модели являются неотъемлемой частью систем контроля качества, оптимизации агротехнических и мелиоративных работ и других управляющих систем. Начало же этим моделям было положено еще в середине XX века, когда еще и ЭВМ по сути не были общедоступны. Начало было положено трудами Сергея Владимировича Нерпина.

---

### Регулирование температуры почвы

Физическими основами регулирования температуры являются следующие процессы, основанные на изменении составляющих теплового баланса и теплофизических свойств почвы:

- изменение альбедо поверхности почвы;
- уменьшение теплопотерь почвы;
- увеличение теплопроводности почв

Покрытие поверхности темными веществами (торф) приводит к значительному уменьшению альбедо, и, соответственно, к увеличению поглощения почвой энергии. Вспомним, альбедо - отношение отраженной коротковолновой энергии к поступившей. Уменьшит альбедо, значит уменьшить, прежде всего, отражение почвой радиации, увеличить поступление в нее тепла. Это традиционные приемы, которые нередко называют мульчированием поверхности. Мульчирование поверхности в теплые периоды приводит к снижению температуры почвы, к ее затенению. Тем самым, в самом широком смысле, мульчирование уменьшает амплитуду температур поверхности почвы, «сглаживает» ее динамику.

Другой прием, основанный на изменении балансовых составляющих, связан с уменьшением величины нагревания приземного слоя воздуха –  $H_a$ . Точнее, с использованием теплоизлучения почвы на нагревание самой же почвы. Звучит парадоксально, но это очень эффективный прием: гребневание поверхности почвы. Этот прием приводит к тому, что почва с боковых поверхностей гребней излучает тепло на боковые поверхности близлежащих гребней. Это излученное боковой поверхностью гребня не теряется, а приобретает соседствующими с ним. Суммарно, почва меньше теряет тепла. А, кроме того, при гребневании поверхность почвы увеличивается, она опять-таки суммарно потребляет больше энергии, чем выровненная поверхность почвы. Это схематически показано на рис. II.3.2.

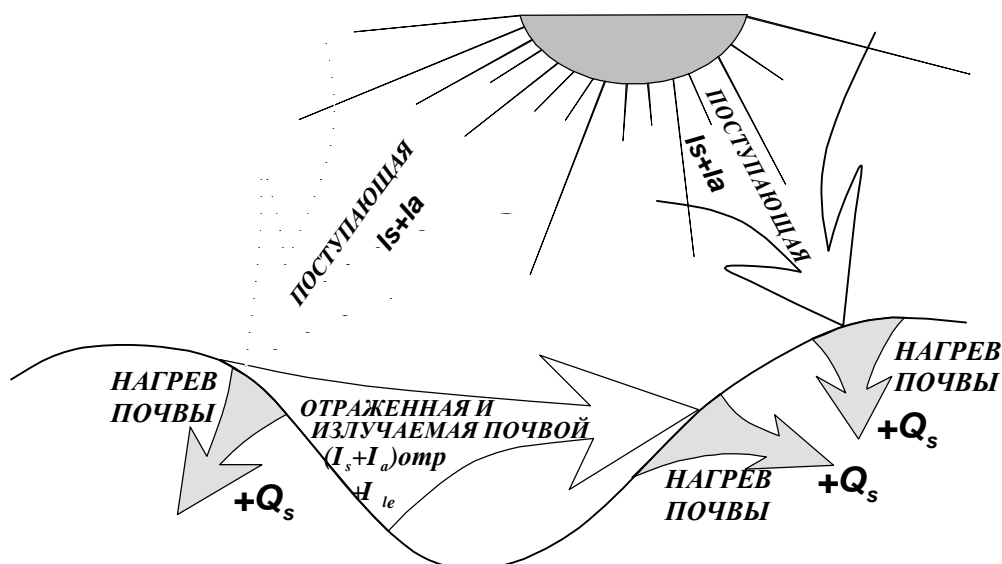


Рис. П.3.2. Распределение тепловых потоков на поверхности почвы при гребневании.

Не следует, однако, забывать, что в случае придания поверхности такого волнистого мезорельефа будет происходить и увеличение испарения. Подобного рода грядки будут быстрее сохнуть, являясь физическими аналогами небольших «фитилей» значительно быстрее испаряющих влагу, чем выровненная поверхность почвы.

Изменение теплофизических свойств почв, увеличение ее теплопроводности также является способом регулирования температурного режима. Вспомним, что теплопроводность почвы есть частное от деления теплопроводности на теплоемкость почвы. Увеличить теплопроводность можно, создавая условия для лучшего проникновения тепла. А это оптимум влажности, когда в наибольшей степени выражены все механизмы теплопереноса, увеличение контактов между частицами (т.е. некоторое уплотнение), увеличение доли крупных минеральных частиц (а это пескование). А уменьшение теплоемкости достигается снижением влажности, увеличением доли минеральных компонентов, имеющих низкую теплоемкость. Это достигается, как правило, внесением песка, пескованием. В этом случае, во-первых, увеличивается доля минеральных частиц, хорошо контактирующих друг с другом, а во-вторых, меньше задерживается вода за счет более быстрого ее стока, т.е. понижается влажность почвы. Все это и приводит к более быстрому прогреванию почв после пескования.

Особое значение на регулирование температуры почвы имеет распашка. В большинстве случаев, даже в различных климатических поясах распашка приводит к повышению температуры почвы. По ряду данных распашка почвы в условиях вечной мерзлоты приводит к понижению уровня вечной мерзлоты, более значительному прогреву верхних слоев почвы. В черноземной зоне распашка также приводит к увеличению температуры поверхностного слоя, в особенности в случае использования пашни под черный пар. Различия в этом случае могут наблюдаться до глубин 100-150 см и достигать 2-6°C. Поэтому распашку почв, кроме ее основного предназначения для борьбы с сорной растительностью, можно отнести и к приемам регулирования температурного режима.

#### Литература

- Ш у л ь г и н А. М. Климат почвы и его регулирование. 2-е издание. Л.: Гидрометеиздат. 1972.  
 Ш у л ь г и н А. М. Агрометеорология и агроклиматология. Л.: Гидрометеиздат. 1978.  
 Р е в у т И. Б. Физика почв. Изд-во «Колос», 1972.



### Часть III Агрофизика продукционного процесса в растениях

#### Введение

В этой главе мы рассмотрим такие важные процессы в растениях как фотосинтез, дыхание, рост, развитие и влияние на эти процессы физических факторов среды: влажности почвы, световой энергии, температуры воздуха и почвы, а также фактора времени, - изменения физиологических процессов в процессе жизни одного растения, в онтогенезе. В данной главе мы по-прежнему сохраним специфический агрофизический метод анализа и познания: от экспериментальных данных, через количественные зависимости к системной физической и математической модели явления. Причем важнейшим параметром зависимостей и моделей будет служить конечно же, продуктивность растений и агроценоза в целом.

Мы внедряемся в пограничную область наук, в область физиологии растений. Поэтому многое из фундаментальной науки «Физиология растений» будет представлено в этой части. Современная физиология растений рассматривает биохимические и молекулярные основы процессов в растениях, ферментативные механизмы регуляции. Но все-таки отличие подходов (напомним, что агрофизика интересуется прежде всего влиянием физических факторов внешней среды на рост и продуктивность растений и управлением с помощью этих факторов продукционным процессом *на масштабном уровне агроценоза*) несколько изменяет взгляд на традиционный предмет физиологии растений – «науки об общих закономерностях жизнедеятельности растительных организмов» (Б.А.Рубин, 1959). Агрофизический аспект изучения процессов в растительных сообществах состоит прежде всего в том, чтобы выявить зависимости физиологического процесса от физических факторов среды, физические основы этого влияния. Но при этом не следует забывать, что механизмы, определяющие воздействие физических факторов среды на физиологические процессы – это механизмы гормональные. В агрофизике рассматривается в основном функциональные зависимости между воздействующим физическим фактором и фундаментальным физиологическим процессом, не акцентируя внимание на механизмах гормональной регуляции.

Кроме того, весьма важно, что большая область агрофизики связана с земледелием закрытого грунта, - с теплицами, парниками и пр. А в этих условиях управляемые физические факторы (свет, тепло, влажность) могут значительно отличаться от природных, могут захватывать диапазоны значений вообще не встречающихся в естественных условиях. Знание физиологических, продукционных процессов в более широком диапазоне действия известных физических факторов – это тоже особенность данной части.

Наконец, именно в этой части в полной мере будут проявляться те 5 законов агрофизики, о которых речь шла во «Введении» и некоторых предыдущих главах. Напомним их:

1. Закон незаменимости основных факторов жизни и его следствие в виде закона «физиологических часов».

2. Закон неравноценности и компенсирующего воздействия факторов среды.

3. Закон минимума и два следствия: 1) рост интенсивности процесса будет определяться скоростью прироста фактора, наиболее удаленного от оптимума и 2) «компенсирующее» действие других, находящихся не в оптимальных условиях, факторов.

4. Закон оптимума.

5. Закон «критических периодов».

Эта часть будет включать следующие главы:

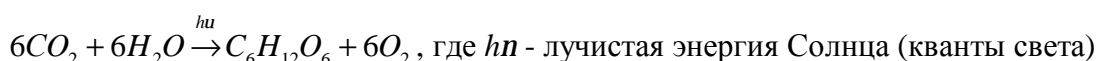
1. Фотосинтез и дыхание.
2. Растение и вода.
3. Физика минерального питания растений.
4. Растение и свет
5. Рост, развитие и формирование продуктивности

### Часть III.1. Фотосинтез и дыхание растений

В данном разделе речь пойдет лишь об автотрофных организмах, о царстве растений, способных синтезировать органические вещества из неорганических. Физические закономерности и особенности гетеротрофного питания, которое характерно для всех животных, грибов и большинства бактерий, в данном случае не рассматриваются. Основу же автотрофного питания составляет процесс фотосинтеза.

#### Фотосинтез

Фотосинтез – процесс превращения солнечной энергии в химическую, которая накапливается растениями в виде питательных органических веществ. Итоговым уравнением фотосинтеза является следующее:



Однако это уравнение отражает лишь суммарный процесс фотосинтеза, никоим образом не раскрывая его сути, - превращения зелеными растениями лучистой энергии Солнца в энергию химических связей органических веществ в результате цепи окислительно-восстановительных реакций с участием хлорофилла (или пигментов пластид), ряда ферментов, формирующих основной универсальный «аккумулятор» энергии – нуклеотид АТФ (аденозинтрифосфорную кислоту или аденозинтрифосфат). Всю сложность процесса фотосинтеза в данной книге отразить не имеется возможности. Однако, основные принципиальные моменты, важные для понимания влияния физических факторов на фотосинтез, можно изобразить в виде следующей схемы (рис. III.1.1).

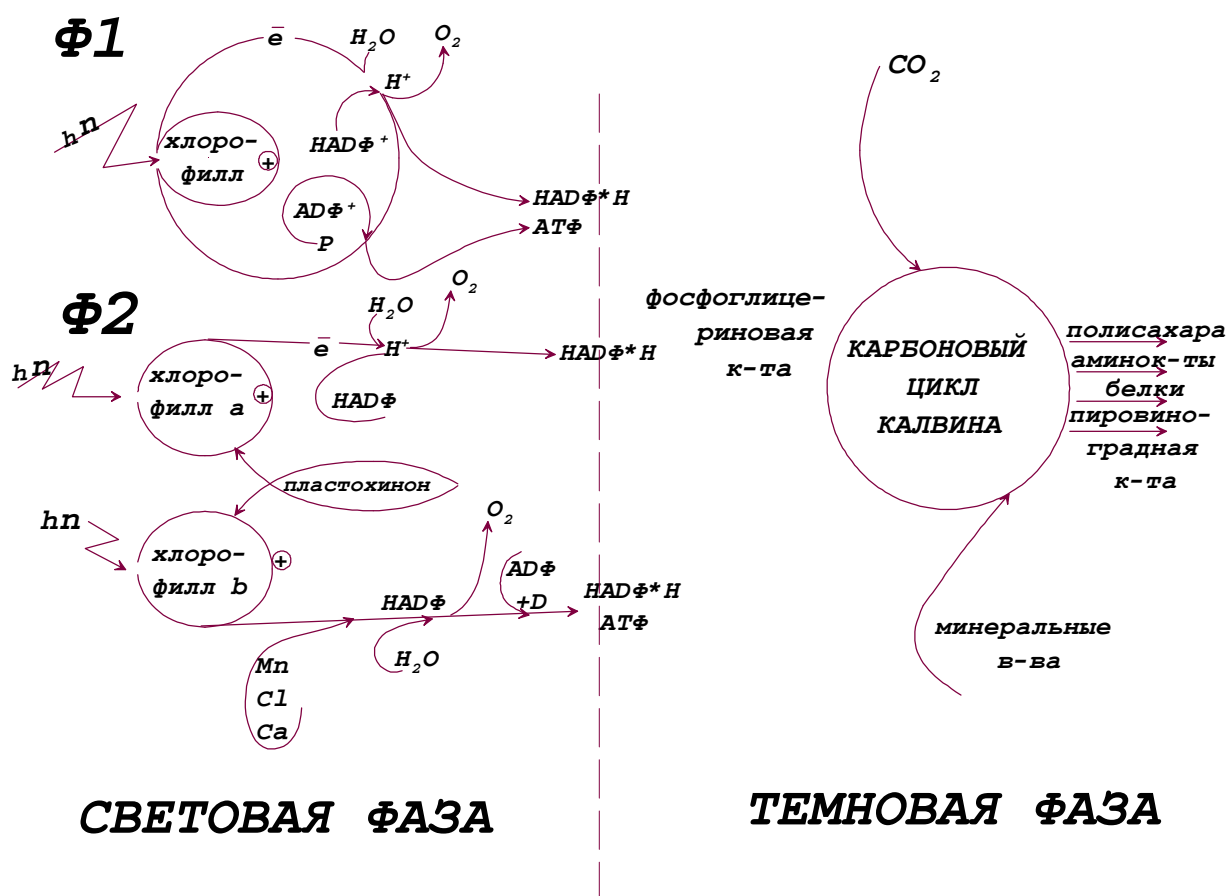


Рис. III.1.1.Схема световой и темновой стадий фотосинтеза. Цикл Калвина.

Итак, квант света (преимущественно из красного и сине-фиолетового участков спектра) поглощается хлорофиллом. Эта уникальная молекула при этом возбуждается, электрон с ее орбиты срывается и начинает участвовать в последовательных реакциях. Прежде всего, происходит реакция фотосинтетического фотолиза воды. В результате этой реакции с участием ферментов образуется протон ( $H^+$ ), свободный кислород и вода из группы  $OH$ . Итак, первый материальный итог фотосинтеза – образование и выделение кислорода. Между тем, образовавшийся протон присоединяется к коферменту  $НАДФ$ , формируя первый аккумулятор химической энергии – молекулу  $НАДФ \cdot H$ . Однако, основным универсальным аккумулятором энергии служит молекула  $АТФ$ , образующая в результате реакции фосфорилирования: присоединения неорганического фосфата к  $АДФ$  (аденозиндифосфата). В результате, как видно из рис III.1.1, образуются две энергетически «ресурсные» молекулы –  $АТФ$  и  $НАДФ \cdot H$ , которые способны давать энергию для формирования сложных органических веществ из углекислоты воздуха. Это, второй важнейший итог фотосинтеза – образование молекул  $АТФ$  и  $НАДФ \cdot H$ , являющихся аккумуляторами энергии. И эти два важнейших результата фотосинтеза происходят на так называемой световой фазе фотосинтеза, которая происходит при обязательном участии лучистой энергии, - квантов света, поглощаемых хлорофиллом. Это общая схема протекания 1-го, с участием лучистой энергии, этапа фотосинтеза. Причем протекающего по циклической схеме, или фотосинтеза I ( $\Phi I$ ).

Световая фаза фотосинтеза может протекать и нециклически (на рис III.1.1 –  $\Phi 2$ ). В этом случае на этой фазе уже участвуют два типа хлорофилла – хлорофилл  $a$  и  $b$ . Итогом  $\Phi 2$  также является образование энергетических аккумуляторов, молекул  $НАДФ H$  и  $АТФ$ , выделение свободного кислорода при фотолизе воды. Однако протекание этого процесса невозможно без участия минеральных ионов марганца, хлора, кальция. А некоторые запасы пластохинонов является связующим звеном работы хлорофиллов  $a$  и  $b$ . Роль пластохинонов заключается в передаче электронов в сложных физико-химических реакциях световой фазы фотосинтеза. Нередко указывают, что второй путь фотосинтеза,  $\Phi 2$ , является более эволюционно молодым.

Итак, на первой стадии фотосинтеза, - световой, за счет процессов движения электронов идет постепенный и плавный процесс формирования энергетически емких молекул  $АТФ$  и  $НАДФ \cdot H$  и образования газообразного кислорода.

На второй стадии фотосинтеза, - темновой, - происходит синтез сложных органических веществ (углеводов, белков и др.) из фосфоглицериновой кислоты, минеральных веществ, поступающих из почвы, и  $CO_2$  атмосферы, - так называемый карбоновый цикл Калвина (рис III.1.1). Энергия для этого белкового синтеза – это энергия, запасенная в молекулах  $АТФ$  и  $НАДФ \cdot H$ , образовавшихся на световой стадии, которые способствуют восстановлению  $CO_2$  до углевода. Подсчитано, что для такого рода восстановления необходимо 3 молекулы  $АТФ$  и 2 молекулы  $НАДФ \cdot H$ . Цикл Калвина, в котором образуются первые трехуглеродные продукты (фосфоглицериновая кислота и др.) в приведенном свойственен не всем, а только группе растений, так называемым  $C3$ -растениям (вполне понятно, что название  $C3$ -растения связано с трехуглеродными компонентами цикла Калвина). В эту группу входит большинство сельскохозяйственных растений: пшеница, подсолнечник, картофель и др. Однако, в некоторых травянистых растениях (например, кукуруза, просо, сорго, сахарный тростник) в качестве первых продуктов образуются четырехуглеродные соединения. Вполне понятно, что эти растения формируют группу  $C4$ -растений.  $C4$ -растения нередко называют растениями с «кооперативным фотосинтезом», подчеркивая итог этого способа фотосинтеза в виде формирования  $C4$ -кислот (малат, аспарат). Но есть и еще одна группа растений, у которых устьица в темноте открыты и идет темновая фиксация  $CO_2$ , результатом которой является образование яблочной кислоты, а затем, уже на световой стадии, углеводов. Эти растения

называют САМ-растения. Для нас важно, что продукционный процесс у этих трех групп различен; различны и суточная продуктивность фотосинтеза, и транспирационный коэффициент: суточная продуктивность для СЗ, С4 и САМ-растений составляет 70-100, 150-200 и 30-50 мг  $\text{CO}_2/(\text{дм}^2 \text{ сут})$ , а транспирационный коэффициент 400-500, 200-400 и 100 г  $\text{H}_2\text{O}/\text{г}$  сухой биомассы. Получается, что С4-растения обладают наилучшими показателями фотосинтеза и экономичным водным питанием, особенно, при высоких (30-40 градусов) температурах.

Важным результатом темновой стадии фотосинтеза является поглощение из атмосферы  $\text{CO}_2$ , а итогом – образование сложных органических веществ-ассимилянтов, формирующих основные запасы, участвующих в процессах дыхания, увеличения биомассы и формирования генеративных и других органов. Для нас не менее важно то, что этот этап фотосинтеза – цепь термохимических реакций, интенсивность которых будет зависеть от температуры внешней среды. Поэтому, выделяются как минимум три основных физических фактора, - температура, свет и концентрация  $\text{CO}_2$  в межклеточниках листьев, определяющими этот важнейший процесс в растениях. Учитывая, что для фотосинтеза необходима и вода, роль влагообеспеченности растений в процессе также незаменима.

#### *Определение*

**Фотосинтез** – процесс превращения солнечной энергии в химическую, которая накапливается растениями в виде органических веществ, как запасных, так и включающихся в разнообразные последующие реакции в растении. Этот процесс состоит из двух стадий: световой, в которой квант света поглощается хлорофиллом и за счет ряда окислительно-восстановительных реакций образуется аккумуляторы энергии – молекулы *АТФ* и *НАДФ · Н* и выделяется свободный кислород, и темновой, когда за счет энергии, аккумулированной в *АТФ* и *НАДФ · Н*, атмосферного углекислого газа и минеральных веществ, создаются разнообразные ассимилянты, а впоследствии - белки, углеводы, нуклеиновые кислоты, полисахариды и другие сложные органические вещества.

**Интенсивность процесса фотосинтеза** будет изменяться в соответствии с физическими факторами внешней среды: интенсивностью ФАР, спектральным составом света, температурой, содержанием и скоростью диффузии  $\text{CO}_2$  в межклетники и давлением влаги в растении.

Следует подчеркнуть, что не только (а нередко, и не столько) физические факторы определяют интенсивность фотосинтеза. Например, фотосинтез будет зависеть от концентрации хлорофилла: чем она выше, тем больше пропорция поглощенного света по отношению ко всему поступившему. Однако, эта зависимость далеко не линейна. Для каждой длины волны фотосинтетически активных лучей ( $\lambda$ ), соотношение интенсивности поглощения этих лучей ( $a_l$ ) и концентрации пигмента ( $c$ ) имеет следующий вид:

$$a_l = 1 - \exp(-k_l l_l c)$$

где  $k_l$  - константа, а  $l_l$  - длина оптического пути для световой энергии в растении. Причем, не обязательно в листе растения. Нередко этот путь проходит по всему стеблю растения, а фотосинтез происходит в прикорневой части (см. «*К вопросу о...*»: Растения и световоды). Кроме того, приведенное уравнение справедливо для гомогенных систем, например, для экстракта хлорофилла раствором ацетона. Лист же растения чрезвычайно гетерогенная система, которая способствует более активному поглощению света.

### **Влияние физических факторов на интенсивность фотосинтеза Влияние интенсивности и спектрального состава света**

Как уже было отмечено выше, фотосинтез будет зависеть от поступающей световой энергии. Вспомним, что световая энергия может измеряться в системе СИ в [дж/(м<sup>2</sup>с)], в ваттах [Вт/м<sup>2</sup>], а также в [эрг/(см<sup>2</sup>с)]. Все эти размерности энергии можно встретить в литературе. Соотношение их: [дж/(м<sup>2</sup>с)] = [Вт/м<sup>2</sup>] = 1000 [эрг/(см<sup>2</sup>с)]. Кроме того, освещенность, которая существенно зависит от угла падения световых лучей, измеряется в люксах [лк], в люменах на квадратный метр [лм/м<sup>2</sup>] или в канделах на квадратный метр [кд/м<sup>2</sup>]. Более подробно физические размерности и характеристические величины изложены в Части II, и в «Справочных материалах».

Если измерять фотосинтез в мг ассимилированного CO<sub>2</sub> на дм<sup>2</sup> поверхности листа в час [мг/дм<sup>2</sup> ч], а интенсивность света - в ваттах на квадратный метр или сантиметр [Вт/см<sup>2</sup>] поверхности, то кривая зависимости фотосинтеза от интенсивности света будет иметь следующий вид (рис. III.1.2.)

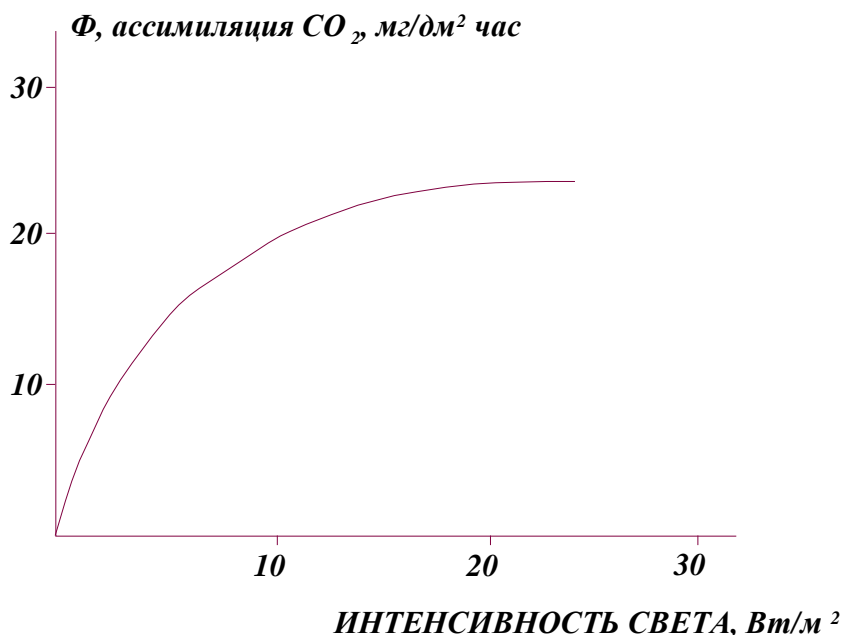


Рис. III.1.2. Световая кривая фотосинтеза - зависимость фотосинтеза ( $\Phi$ , мгCO<sub>2</sub>/дм<sup>2</sup> ч) от интенсивности поступающей лучистой энергии (Вт/м<sup>2</sup>)

Такой тип кривой - возрастающая кривая с насыщением, нередко называется кривой логарифмического типа. При малых интенсивностях света фотосинтез растет очень быстро. То, что фотосинтез возможен при очень слабом свете, было доказано еще в 1880 г. А.С.Фаминицыным. А вот при повышении интенсивности света рост фотосинтеза снижается и достигает практически постоянных значений сколь бы интенсивность света не повышалась. Обычно для характеристики процессов, подчиняющихся такого рода зависимостям, используют параметр, отражающий угол наклона кривой в нарастающей ее части. Чем выше этот параметр, тем более активно происходит нарастание процесса, что и является характеристикой процесса, его особенностей. В данном случае фотосинтеза. Если этот угол будет большим, кривая фотосинтеза круто идет вверх при слабом начальном изменении света, и это означает, что растения очень активно используют световую энергию, в особенности при малых ее значениях. Иногда этот параметр называют параметром светочувствительности, так как чем он выше, тем чувствительнее растение к добавлению даже небольшой интенсивности света. Повышенный параметр светочувствительности характеризует группу теневыносливых растений. Кроме того, важным параметром служит и количество световой энергии, при которой кривая выполаживается, - это фотосинтез при полном обеспечении растений световой энергией. Этот параметр характеризует «мощность» фотосинтеза, который, как правило, выше у светолюбивых растений (Более подробно об этом в Главе III.4. «Растения и свет»).

Такой вид зависимости позволил предложить и функциональные зависимости фотосинтеза от физических факторов. Однако, не в виде логарифмической функции (типа  $y = \log_a x$ ), которая не совсем удачно описывает фазу стабилизации фотосинтеза при высокой интенсивности радиации (фазу «насыщения» фотосинтеза). Чаще используют для такого рода экспериментальных зависимостей уравнение логистического типа, в данном случае, связывающее интенсивность фотосинтеза при оптимальных условиях тепло- и влагообеспеченности ( $\Phi$ ) и интенсивность фотосинтетически активной радиации ( $\Phi_{AP}$ ),  $I_{\Phi AP}$ :

$$\Phi = \frac{\Phi_0 b I_{\Phi AP}}{\Phi_0 + b I_{\Phi AP}}$$

где  $\Phi_0$  – интенсивность фотосинтеза при полном световом насыщении,  $b$  – начальный наклон световой кривой фотосинтеза (параметр светочувствительности или теневыносливости).

С такого рода зависимостями логистического типа мы еще столкнемся при изучении вопроса о возможности математического моделирования продукционного процесса в растениях. Однако следует отметить, что при неограниченном воздействии такого фактора как световая энергия, а также для реальных растений, а не изолированных пластин листа, мы также будем иметь вид кривой, соответствующий виду биологической кривой (см. «К вопросу о...»).

Об уравнениях, описывающих физиологические процессы

К вопросу о...

Мы не раз столкнемся с некоторыми уравнениями, с помощью которых описывают процессы роста от различных факторов, фотосинтеза от интенсивности поступающей радиации, парциального давления  $CO_2$  и многие другие процессы в растениях. Наиболее часто для такого рода процессов в виде «интенсивность» - «воздействующий фактор» используют уравнение, график которого представляет собой кривую, интенсивно растущую в области малых значений воздействующего фактора, а затем постепенно «выползающуюся», превращающуюся в прямую, практически параллельную оси абсцисс. Очень характерный вид кривой для биологических процессов. Иногда, правда, в самом начале этой кривой отмечается участок медленного роста, так называемая «лаг-фаза», которая уже сменяется интенсивным ростом процесса. Но, в целом, это очень характерная кривая (рис.1).

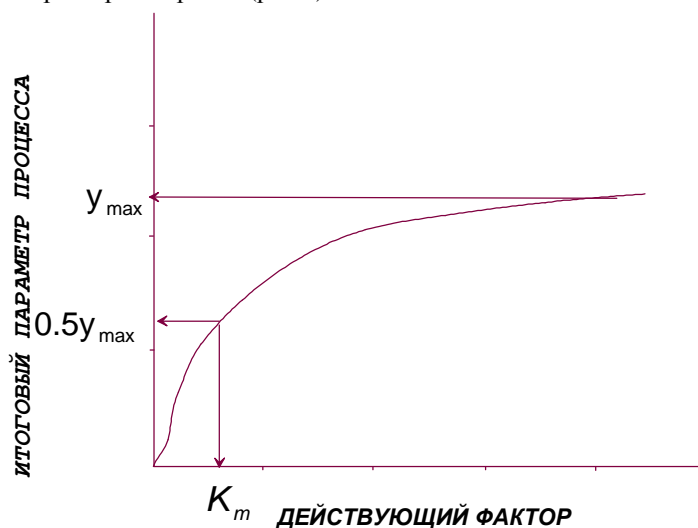


Рис.1. Логистическая кривая

Такого типа кривые описываются уравнениями, которые получили название логистических. Оно имеет вид:

$$y = \frac{y_{\max} \cdot K_m \cdot x}{1 + K_m \cdot x}$$

А для биологических процессов его впервые предложил немецкий ученый Леонор Михаэлис (1875-1949). Он приложил к изучению энзимов правила химической кинетики и в 1913 г. вывел уравнение, описывающее изменение суммарного количества продуктов каталитической реакции в разных условиях, подтвердив, что энзимы подчиняются физико-химическим законам. Константа  $K_m$ , характеризующая величину действующего фактора, при которой параметр процесса равен половине максимальной ( $y_{max}$ ), характеризует «крутизну» кривой: чем она меньше, тем интенсивнее накапливается суммарный параметр при увеличении действующего фактора. Эта константа названа в честь Леонора Михаэлиса константой Михаэлиса.

Большинство биологических процессов имеют вид куполообразных функций: вначале под действием какого-либо фактора интенсивность (подчеркнем, - именно интенсивность, а не итоговое значение как в предыдущем примере) биологического процесса возрастает быстро, затем достигает максимума при оптимальном действующем факторе, а при дальнейшем увеличении фактора, интенсивность биологического процесса начинает убывать (рис.2). Для описания такого рода поведения биологического процесса используют либо параболу, либо гауссиаду. Последняя наиболее точно отражает биологические процессы за счет, прежде всего постепенного нарастания интенсивности при увеличении действующего фактора, - вида «колокольчика». Уравнения, их описывающие выглядят следующим образом:

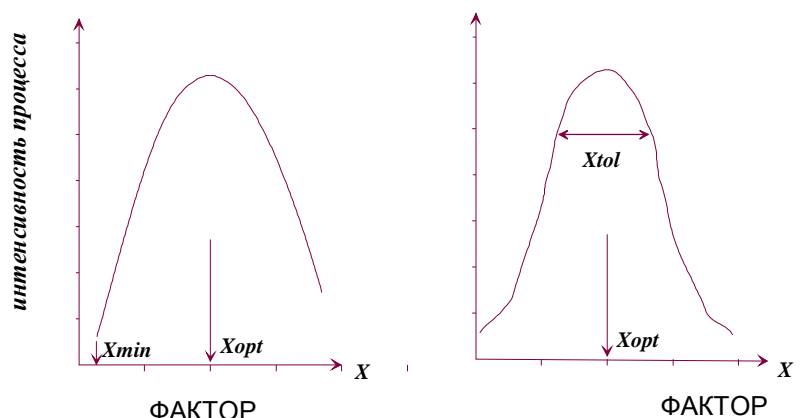


Рис.2. Параболическая кривая и гауссиада.

$$y = b1 \cdot (-b2 \cdot x^2 + b3 \cdot x), \text{ либо } y = b1 - \left( \frac{x}{b2} \right)^{b3} - \text{парабола и } y = b1 \cdot \exp\left(-\frac{(x - b2)^2}{b3}\right) -$$

гауссиада. Причем в последнем случае параметры уравнения Гаусса  $b2$  и  $b3$  имеют биологический смысл:  $b2$  – это биологический оптимум ( $X_{opt}$ ), а  $b3 - X_{tol}$ , диапазон действующего фактора, в котором интенсивность процесса близка к оптимальному. Это диапазон толерантности. Хотя сам Карл Фридрих Гаусс (1777-1855) вряд ли предполагал, что его функция ошибок найдет столь широкое применение в биологии. Свои математические выкладки он применял в астрономии и геодезии. В должности директора Геттингенской астрономической обсерватории он оставался до последних дней жизни. Но его математические выкладки оказались востребованы биологической наукой, агрофизикой и многими другими науками о Природе.

В регулируемых условиях, при заметно более широком диапазоне мощностей лучистой энергии, чем солнечная, были получены кривые зависимости сухого веса растений хлопчатника от мощности светового потока, идентичные общебиологическим кривым (см. «К вопросу о...»). На рис. III.1.3 приведены результаты опыта с растениями хлопчатника, выращиваемого в условиях искусственного освещения. Освещенность растений колебалась от 100 Вт/м<sup>2</sup> (что соответствует 0.08 от мощности прямой солнечной) до 1000 Вт/м<sup>2</sup>, что ненамного превышает мощность прямой солнечной лучистой радиации. Из приведенного рисунка следует, что в искусственных условиях уже при половинной от солнечной мощности света растения достигали максимальной биомассы, а увеличение этой мощности более 800 Вт/м<sup>2</sup> оказалось даже и вредным, понижающим биомассу растений.

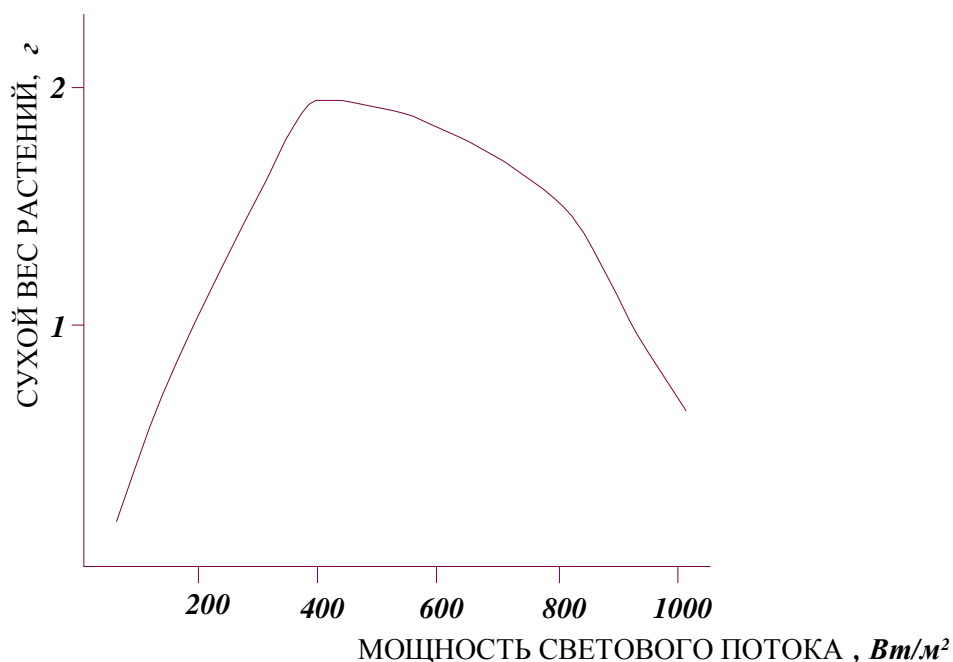


Рис. III.1.3. Влияние мощности лучистого потока на биомассу проростков хлопчатника (по Мошкову, 1959).

Приведенные факты подчеркивает два важных момента:

1. В регулируемых условиях, при интенсивностях абиогенных факторов значительно выше природных вид биологических зависимостей может изменяться, оставаясь в целом, близким к виду общебиологических кривых (вид параболы или гауссиады).
2. Не следует полностью переносить кривые, полученные для одного биологического процесса (фотосинтеза) на процессы более высокого уровня, такие как рост, развитие, продуктивность. Хотя эти фундаментальные процессы и являются основными при формировании продуктивности.

Об этих двух моментах не следует забывать и при рассмотрении воздействия других физических факторов на биологические процессы.

### Спектральный состав света

Можно предположить, что неодинаковый по спектральному составу свет будет также оказывать влияние на интенсивность фотосинтеза. Ведь не даром большинство растений на нашей планете – зеленые. По-видимому, это эволюционно выгодно, т.е. интенсивнее всего растения росли и созревали, в условиях, когда преобладали другие, кроме желто-зеленой, части спектра. Хотя, эта часть спектра и не является энергетически самой низкой. Напротив, максимальные значения световой энергии в суммарной радиации при безоблачном небе приходятся как раз на зеленую и сине-зеленую области (рис. III.1.4).



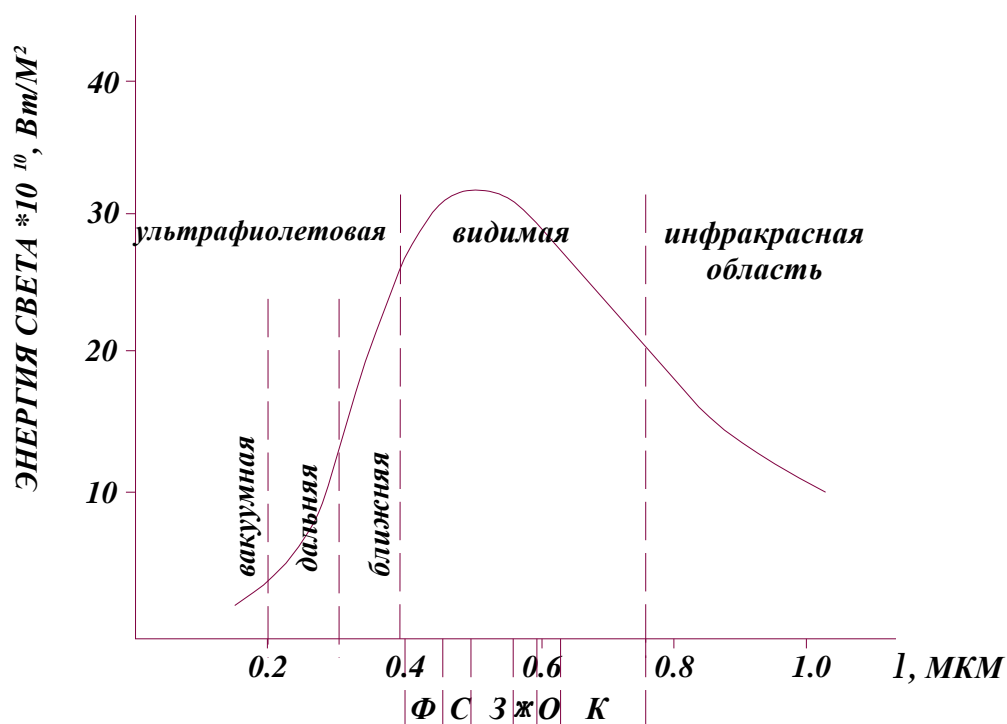


Рис. III.1.4. Распределение световой энергии в спектре дневного солнечного света (по И.А.Шульгину, 1967).

Однако, еще в 1869 г. появилась работа К.А.Тимирязева, в которой он приводил исследования, доказывающие, что фотосинтез интенсивнее всего должен происходить в красном участке спектра. Он изучал фотолиз углекислоты и получил данные, указывающие, что наиболее фотосинтетически активная часть спектра – это красная область видимого света. Впоследствии К.А.Тимирязев доказал, что и сине-фиолетовая часть спектра чрезвычайно важна для растений (см. «К вопросу о...»). Получается, что именно в этих двух областях у большинства наземных растений фотосинтез будет протекать наиболее интенсивно. Это и доказывает спектральная кривая фотосинтеза,

приведенная

на

рис

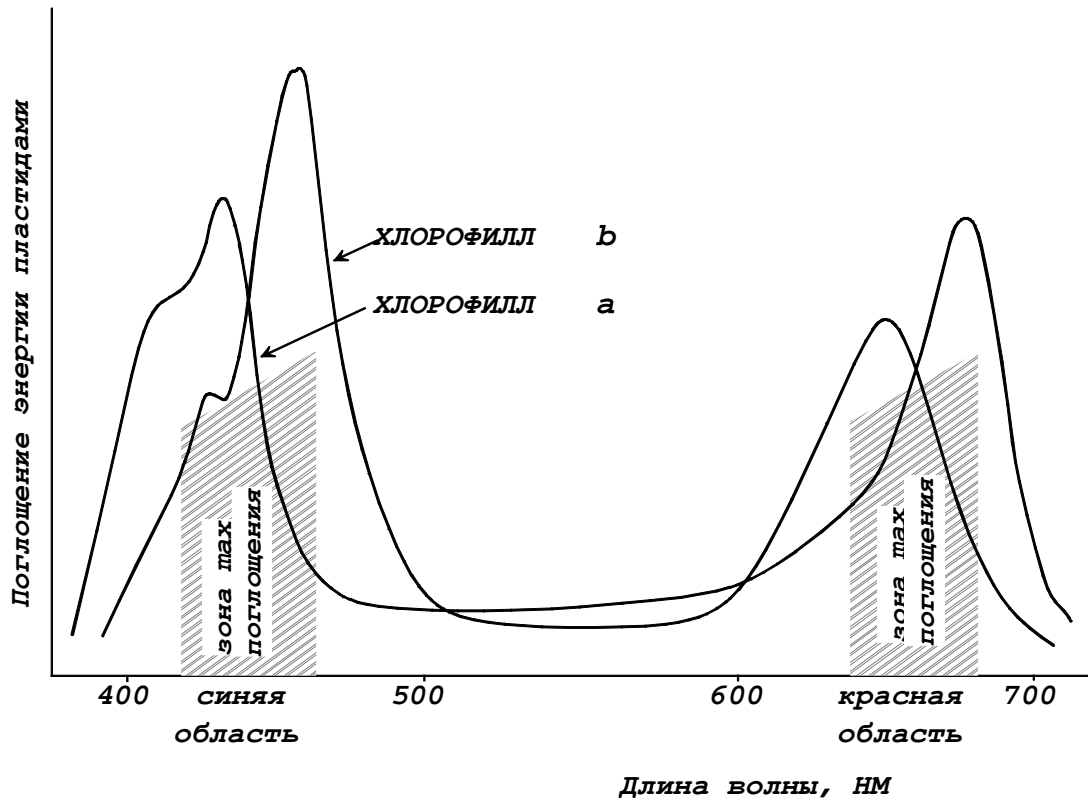


Рис. III.1.5 Спектральная кривая фотосинтеза (представленная по спектрам поглощения пигментов пластид)

Таким образом, фотосинтетически активная радиация находится в области 400–700 нм. В этой области имеются два максимума поглощения, – для лучей с длинами 620 и 440 нм.

*К вопросу о...*

Климент Аркадьевич Тимирязев (1843-1920)

Климент Аркадьевич окончил Петербургский университет с золотой медалью и прошел фундаментальную научную школу в Европе, где в то время работали Буссенго, Гельмгольц и многие другие светила химической науки. Преподавал в сельскохозяйственной академии, ныне носящей его имя, и в Московском университете. Его научные труды известны всем, неоспоримы его научные доказательства влияния различных диапазонов светового спектра на фотосинтез, исследования хлорофилла. Но, пожалуй, главное – это новое понимание роли растений для нашей планеты, новое (как сейчас сказали бы) глобальное мышление. Именно Климент Аркадьевич указал на космические связи энергии Солнца, формирования растительной биомассы, он открыл путь превращения солнечного света в химические соединения, формирования жизни на нашей планете за счет трансформации, казалось бы, неощутимой энергии солнечных лучей. Вот как образно и красиво он описывает это в своей книге «Жизнь растения»: «Когда-то, где-то на землю упал луч солнца, но он упал не на бесплодную почву, он упал на былинку пшеничного ростка, или, лучше сказать, на хлорофилловое зерно. Ударяясь о него, он потух, перестал быть светом, но не исчез. Он только затратился на внутреннюю работу, он рассек, разорвал связь между частицами углерода и кислорода, соединенными в углекислоте. Освобожденный углерод, соединяясь с водой, образовал крахмал. Этот крахмал, превратясь в растворимый сахар, после долгих странствий по растению отложился, наконец, в зерне в виде крахмала же или в виде клейковины. В той или другой форме он вошел в состав хлеба, который послужил нам пищей. Он преобразовался в наши мускулы, в наши нервы. [...] Он приводит нас в движение. Быть может, в эту минуту он играет в нашем мозгу...»

Естественен вопрос, почему же именно в длинноволновой (красно-оранжевой) и коротковолновой (сине-фиолетовой) наблюдаются максимумы. Объяснение, наверное, может быть следующим. С одной стороны, сине-фиолетовая – это одна из наиболее энергетически выгодных областей спектра (см. рис. III.1.5). С другой, красно-оранжевые

лучи преобладают в спектре вечернего света, при приближающемся к закату солнце. А это наилучшее время для работы фотосинтетического аппарата, так как воздух прогрет, температура окружающей растению среды высокая. Да и листья большинства растений так расположены, что именно вечерние лучи попадают на их поверхность перпендикулярно, т.е. наиболее эффективны. Таким образом, на интенсивность фотосинтеза действуют как минимум еще два фактора – температура воздуха и направление светового потока. Что и определяет наиболее интенсивный фотосинтез в красно-фиолетовой части спектра, в вечернее время. Не следует забывать и о том, что эффективность использования ФАР изменяется в процессе развития растений, что доказывается динамикой известного нам параметра «коэффициент использования ФАР»,  $KI_{ФАР}$  (см. Главу II.2)

В научной литературе нередко появляются работы, связанные с исследованием ультрафиолетовой части солнечной радиации на фотосинтез. В большинстве этих работ приводятся факты, указывающие, что радиация этой части спектра снижает фотосинтез. Указывается, что ультрафиолет снижает транспорт электронов в циклах фотосинтеза, ингибирует фотохимические реакции на предварительных стадиях фотосинтеза и др. Вообще – снижает фотосинтетическую интенсивность растений. А, кроме того, приводит к существенным изменениям в росте и развитии растений, снижении отношения побег/корень, угнетает цветение и пр., вплоть до их гибели при высоких потоках ультрафиолета.

Впрочем, влияние спектрального состава света на продуктивность и урожай растений не всегда соответствуют полученным для фотосинтеза закономерностям. Например, в экспериментах с искусственным освещением хлопчатник развивал наибольшую биомассу, и фазы развития наступали раньше всего при желто-зеленом свете! Поэтому фотосинтетические закономерности непосредственно на продуктивность растений переносить не следует. Более подробно о влиянии света, его интенсивности, спектрального состава и периодичности мы остановимся в части III.4 «Растение и свет».

#### **Влияние влажности почвы и температуры приземного воздуха на фотосинтез**

Другой физический фактор, оказывающий влияние на фотосинтез – это, конечно же, влажность почвы. Ведь именно вода участвует в формировании органических веществ. А она доставляется в листья растений из почвы. Если в листьях будет проявляться недостаток влаги, фотосинтез будет замедляться. Аналогично и при избытке воды в почве потребление воды растением может замедляться, и фотосинтез также уменьшаться. Таким образом, в случае влияния влажности мы имеем куполообразный тип зависимости фотосинтеза от влажности почвы (рис. III.1.6). Ширина «купола» этой зависимости будет характеризовать диапазон влажности почвы, при котором фотосинтез происходит наиболее интенсивно и равен величине  $\Phi_0$ .

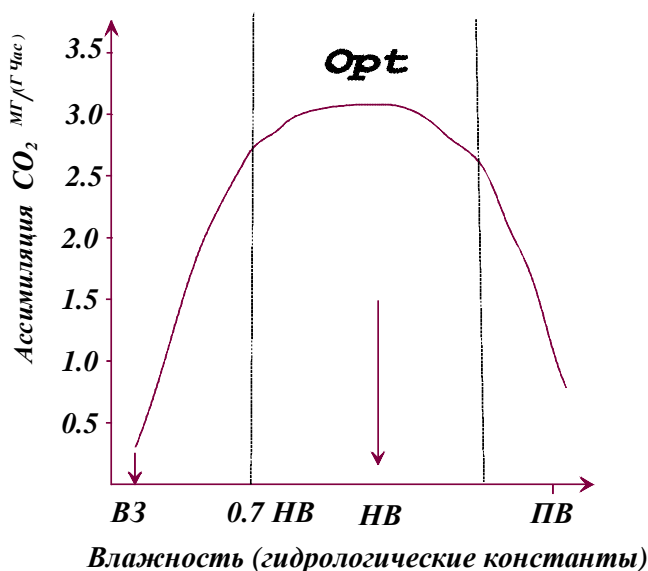


Рис. III.1.6. Зависимость фотосинтеза от влажности почвы, выраженной в виде почвенно-гидрологических констант: ВЗ – влажность завядания, НВ – наименьшая влагоемкость, ПВ – полная влагоемкость или водовместимость

Такой тип куполообразной зависимости с одним экстремумом (максимумом) описывается параболической функцией

$$\Phi = \Phi_0 \left[ -a \left( \frac{3B_{\text{ДЛВ}}}{3B_{\text{НВ}}} \right)^2 + b \left( \frac{3B_{\text{ДЛВ}}}{3B_{\text{НВ}}} \right) \right], \text{ где } a \text{ и } b \text{ – эмпирические параметры,}$$

характеризующие изменение фотосинтеза в процессе развития и старения растения, -  $3B_{\text{ДЛВ}}$  – запасы воды в диапазоне доступной влаги или запасы продуктивной влаги ( $3B$  при НВ за вычетом  $3B$  при ВЗ) в корнеобитаемой толще почвы,  $3B_{\text{НВ}}$  – запасы почвенной влаги при наименьшей влагоемкости.

Аналогично влажности воздействует на фотосинтез и температура: имеется некоторый, связанный с биологическими особенностями растений в ареале их распространения, оптимальный диапазон температур и конкретно оптимальная для фотосинтеза температура воздуха  $T_{\text{opt}}$ , при которой фотосинтез достигает максимального для данных растений уровня – уровне  $\Phi_0$  (рис. III.1.7).

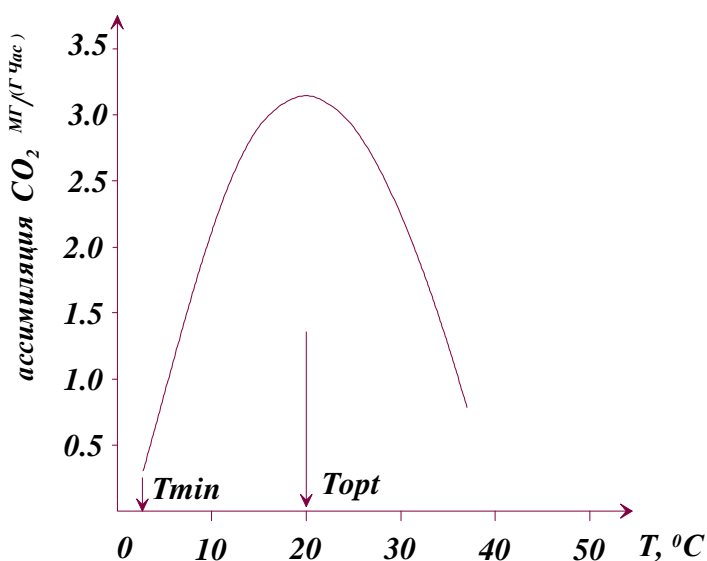


Рис. III.1.7. Температурная кривая фотосинтеза

Для характеристики растений важна и температура, при которой начинается фотосинтез, - минимальная температура ( $T_{min}$ ). Этот параметр зависит от физиологических особенностей растений, их природного ареала, районирования. Так, северные древесные растения (ель, сосна) начинают фотосинтезировать уже при отрицательных температурах  $-15$  -  $-10^{\circ}\text{C}$ . А тропические растения – при  $+4$  -  $+8^{\circ}\text{C}$ .

Такой «куполообразный» вид зависимости также позволяет аппроксимировать ее некоторой функцией зависимости фотосинтеза от температуры, например, предложенной В.Н Полевым:

$$\Phi = \Phi_0 \left\{ 0.2 \frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T} \left[ 6 - \left( \frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right)^5 \right] \right\},$$

где  $T$  – текущая температура воздуха,  $T_{min}$  – минимальная температура воздуха, при которой начинается фотосинтез.

Кроме того, для описания влияния температуры на фотосинтез употребляют и параметр, аналогичный используемому в химической кинетике –  $Q_{10}$ : во сколько раз возрастает скорость реакции при повышении температуры на  $10^{\circ}\text{C}$ . Обычно для фотосинтетических процессов, как для большинства ферментативных реакций,  $Q_{10} = 2-3$ . Однако  $Q_{10}$  не является величиной постоянной для конкретного растения и всей температурной кривой фотосинтеза. Нередко возникают условия, когда температура является единственным лимитирующим фактором (например, ярким утром после ночных заморозков). Тогда параметр  $Q_{10}$  может достигать и значений  $>4$ .

### Минеральное питание и концентрация $\text{CO}_2$ в атмосфере

Вполне понятно, что для образования компонентов и нормальной работы фотосинтетического аппарата необходимы минеральные вещества, входящие как в состав пластид, ферментов и других компонентов фотосинтеза, так и непосредственно участвующие в фотосинтезе. К последним относится минеральный фосфор, а также ионы хлора, марганца и кальция (см. схемы фотосинтеза, рис. III.1.1). В состав же хлорофиллов ( $a$  и  $b$ ) входит магний, а в состав хлоропластов, участвующих в переносе электрона (цитохромов, ферредоксина), - железо. Поэтому дефицит этих элементов существенно нарушает работу всей фотосинтетической системы. Для функционирования фотосинтетической системы необходимы и другие биофильные макроэлементы – азот и калий. Азот участвует в постройке элементов пластид, структур хлоропластов, а калий, - элемент большинства ферментативных систем, - участвует практически на всех этапах фотосинтеза в разнообразных энзиматических реакциях.

С другой стороны, необходимым минеральным продуктом для фотосинтеза является и наличие основного начального «кирпичика» в формировании трех- или четырехкарбоновых кислот – газообразного  $\text{CO}_2$ . Эта кривая также имеет вид, близкий к логарифмическому, быстро возрастающий для большинства растений от 0 до 0.1% (в земной атмосфере 0.03%  $\text{CO}_2$ ) и достигающий «насыщения» при 0.2-0.3 %. Безусловно, вид этой кривой и ее параметры будут существенно определяться биологическими особенностями растений, типом ассимиляции  $\text{CO}_2$  (C3 или C4-типами). Но в любом случае, получается, что при содержании  $\text{CO}_2$  в естественных условиях фотосинтез приближается лишь к половинному от своего максимального значения. Значение этого факта может быть и не столь велико для растений открытого грунта, но может иметь очень большое значение для теплиц, парников и пр., где возможно достижение повышенного содержания  $\text{CO}_2$ , хотя бы в небольшие промежутки времени для интенсификации фотосинтеза и ускорения ростовых процессов.

Таким образом, содержание  $\text{CO}_2$  является лимитирующим фактором фотосинтеза. Оно определяет газовую функцию фотосинтеза, условия поступления и движения  $\text{CO}_2$  к пластидам. Причем в большей мере это лимитирующее действие проявляется не столько в

концентрации в атмосфере (она, как мы только что выяснили практически константа), а в пути следования  $\text{CO}_2$  к фотосинтетическим пигментам. А этот путь таков:  $\text{CO}_2$  диффундирует из воздуха через устьица в межклеточное пространство. Затем  $\text{CO}_2$  растворяется в воде клеток и уже в водной среде диффундирует к хлоропластам, где и происходит реакция карбоксилирования. Следовательно, существует как минимум три источника сопротивлений диффузионному движению  $\text{CO}_2$  на пути к хлоропластам: сопротивление воздуха вблизи поверхности листа (диффузионное сопротивление воздуха –  $r_a$ ), диффузионное сопротивление устьиц при поступлении  $\text{CO}_2$  в межклетники ( $r_s$ ) и диффузионное сопротивление движению  $\text{CO}_2$  в клеточном растворе, в мезофилле ( $r_m$ ). Как правило, эти сопротивления и являются ограничивающими фотосинтез в отношении фактора  $\text{CO}_2$ , в отношении газообмена при фотосинтезе. В самом общем виде, учитывая, что диффузионный поток всегда пропорционален градиенту концентрации и обратно пропорционален суммарному сопротивлению переноса, можно записать общее выражение зависимости фотосинтеза ( $\Phi$ ) от указанных сопротивлений:

$$\Phi = \frac{c_0 - c_i}{r_a + r_s + r_m},$$

где  $c_0$  и  $c_i$  – концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере и вблизи хлоропластов ( $\text{г CO}_2/\text{см}^3$ ). Это уравнение в качественном виде показывает значение диффузионных сопротивлений на различных участках процесса диффузии  $\text{CO}_2$  из атмосферы к непосредственным фотосинтезирующим «фабрикам» в клетках – пластидам. Эти сопротивления на различных участках этого пути доставки могут заметно сказываться на газообеспеченности, и соответственно, на продуктивности этих «фабрик», на итоговый фотосинтез.

### Изменения фотосинтеза в онтогенезе

И, наконец, следует учитывать не только физические факторы среды, но и биологические особенности растений, прежде всего изменение фотосинтеза в процессе старения растений, или – в онтогенезе. Физиологический возраст растений довольно затруднительно выразить в виде просто времени. Действительно, возможно растение находилось в неблагоприятных температурных условиях. Естественно, наступление фаз развития может задерживаться. Поэтому для оценки физиологического возраста опять-таки используют физические факторы, в которых происходил рост растений. Прежде всего – температуру воздуха. Однако, не просто температуру, а эффективную температуру, как правило, температуру более  $10^\circ\text{C}$ . И не просто измеренную температуру – а сумму эффективных температур. Как говорят, сумму эффективных температур нарастающим итогом. Вот эта-то величина и оказывается основной характеристикой физиологического возраста конкретного вида растений –  $\sum T_{эфф}$ . Зависимость фотосинтеза от физиологического возраста растений в виде параметра  $\sum T_{эфф}$  также имеет вид одновершинной кривой с оптимумом в некотором диапазоне суммарных эффективных температур, характеризующих определенную стадию растений в онтогенезе. На рис. III.1.8. видно, что резкое увеличение биомассы происходит в стадии формирования колоса, когда в растении с наибольшей активностью работает фотосинтезирующий аппарат, формируются запасы органических веществ. Наступление этой стадии, как и последующих хорошо коррелирует с суммой эффективных температур, что позволяет использовать этот параметр для оценки и прогноза наступления той и иной стадии в развитии растений, в онтогенезе. Причем, эта корреляция характерна не только для наступления стадий растений в онтогенезе (стадии «закладки листьев», «формирование колоса», «рост колоса» и «формирование зерна»), но и с числом формирующихся органов, т.е. с числом листьев, числом цветков и пр.. Это позволяет и по сумме эффективных температур определять и число формирующихся органов, которые образуют характерную для каждого вида кривую зависимости числа органов на различных стадиях развития в

зависимости от суммы эффективных температур (рис. III.1.8). Вот такого рода кривые нередко используются для прогноза наступления стадий и оценки числа органов в растений.

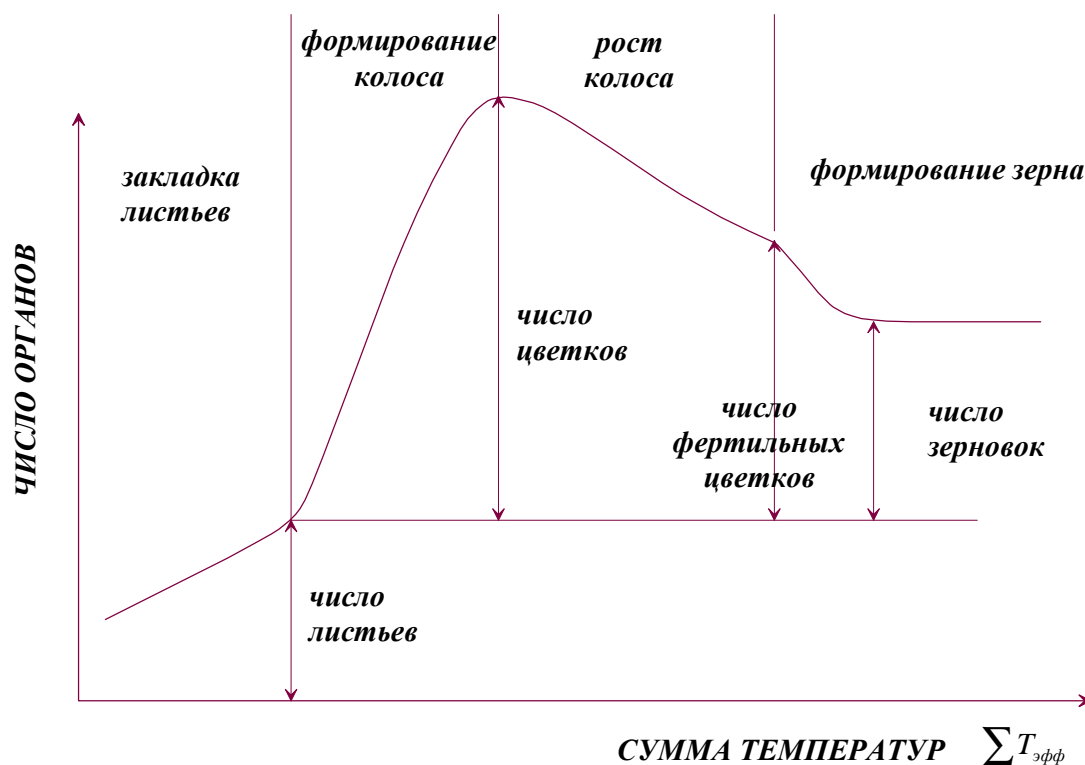


Рис. III.1.8. Число органов на различных стадиях онтогенеза зерновых в зависимости от суммы эффективных температур.

Но, как это обычно бывает в реальных условиях, физические факторы природной среды действуют не по отдельности, а совместно, давая эффект усиления (явление синергизма) или ослабления (антагонизм).

### Совместное влияние факторов

Рассматривая совместное действие различных факторов, следует учитывать, что они могут усиливать или смягчать действия других природных факторов. Но они никогда не могут быть взаимозаменяемы, и мы никогда не сможем полностью компенсировать недостаток света увеличением содержания влаги в почве, недостаток тепла — внесением азотных удобрений и т.д. Физические факторы не могут быть взаимозаменяемы — это один из законов экологии.

Следует иметь в виду и правило лимитирующих факторов. Обычно его представляют в виде закона Либиха (закона Блэкмана-Либиха) закона минимума или, образно, в виде бочки, в которой уровень воды определяется самой низкой из слагающих бочку дощечек. Это означает, что поднять уровень воды в этой бочке можно только «нарастив» самую короткую дощечку. То есть, фотосинтез, рост и развитие растений будут регулироваться только тем фактором, который находится в минимуме. В современной агрофизике этот закон в прямом виде не применяется, он не совсем точен. Действительно, если какой-либо фактор находится в минимуме при оптимальных величинах других факторов, то величина фотосинтеза будет определяться именно этим абиотическим фактором. Но другие факторы, хотя они полностью и не могут заменить находящийся в минимуме, могут смягчить его действие, а иногда и заметно компенсировать. Примером могут служить разнообразные эксперименты по взаимовлиянию интенсивности света и температуры воздуха. В определенном диапазоне недостаток света удается компенсировать

повышением температуры. Это вполне понятно: оба эти фактора определяют температуру листьев растений, и соответственно, интенсивность фотосинтеза. В особенности смягчающее действие синергетических факторов проявляется в критических точках – минимальных температурах, содержания влаги и пр. Но лишь смягчающее, а не заменяющее. Хотя в агрофизике очень важно знать и уметь использовать это смягчающее действие в критические моменты жизни растений – при резком похолодании, заморозках, засухе, а также в условиях закрытого грунта.

И еще один момент взаимовлияния факторов очень важен. Если какой-либо из факторов находится в минимуме, а группа других факторов оказывает смягчающее воздействие, то интенсивный прирост фотосинтеза возможен только при прибавлении этого фактора. Об этом говорят формы кривых зависимостей фотосинтеза от абиотических факторов: наиболее крутой рост фотосинтеза всегда наблюдается в области значений фактора несколько выше минимального критического. Этот факт мы уже отмечали, когда указывали, что если температура является лимитирующим фактором при оптимуме освещенности, влагообеспеченности растений, то  $Q_{10}$  в этих условиях может составлять величины  $>4$ , тогда как в обычных условиях  $Q_{10}$  составляет 2-3.

Мы также указывали, что увеличение концентрации  $CO_2$  способствует увеличению фотосинтеза и обладает синергетическим действием с другими абиотическими факторами. Например, хорошо известно, что световые кривые фотосинтеза будут изменять и свое максимальное значение ( $\Phi_0$ ) и угол наклона ( $b$ ) при различной концентрации  $CO_2$  в воздухе (рис. III.1.9, по Б.А.Рубину и В.Ф.Гаврилену, 1977).

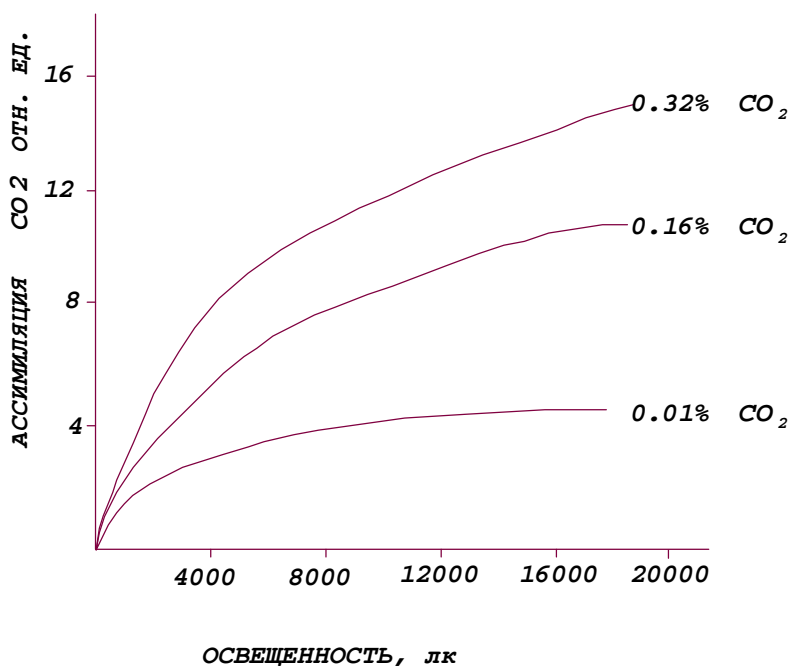


Рис. III.1.9. Световые кривые фотосинтеза при различной концентрации  $CO_2$ .

Из этих кривых ясно, что интенсивность фотосинтеза в 3 условных единицы может быть достигнута при освещенности в 1200 люксов (лк), в 1900 и в 6000 лк при концентрациях  $CO_2$  0.32, 0.16 и 0.04%. А это совершенно определенно означает, что регулировать фотосинтез в условиях недостаточной освещенности, например, в условиях теплиц можно с помощью изменения  $CO_2$ , что может оказаться более эффективным, оперативным и надежным. Но, - подчеркнем, - полностью компенсировать недостающий фактор среды (освещенность) другим (содержанием  $CO_2$  в воздуха) не удастся, возможно только регулирование в определенном диапазоне. Приведенные на рис. III.1.9 зависимости как раз и указывают эти возможности регулирования.



Фотосинтез зависит от притока минеральных веществ и количества образующихся и накапливающихся продуктов. Это вполне объяснимо. Ведь в основе фотосинтеза лежат разнообразные химические реакции, которые всегда подчиняются правилу Ле Шателье-Брауна, правилу смещения химического равновесия в зависимости от внешних факторов: воздействие факторов, отклоняющих систему от равновесия, вызывает в системе процессы, стремящиеся ослабить эффект воздействия. В частности, заметное увеличение фотосинтеза с ростом освещенности проявляется только при достаточном обеспечении растений азотом. Азот участвует в синтезе белков. Его наличие дает возможность растению устанавливать равновесие биохимических реакций на более высоком уровне, наиболее полно использовать свой фотосинтетический аппарат, в полной мере использовать световую энергию и формировать белки. Поэтому и форма зависимости фотосинтеза от интенсивности лучистой энергии имеет вид логистической кривой с различным углом наклона для различных доз азота (рис. III.1.10).

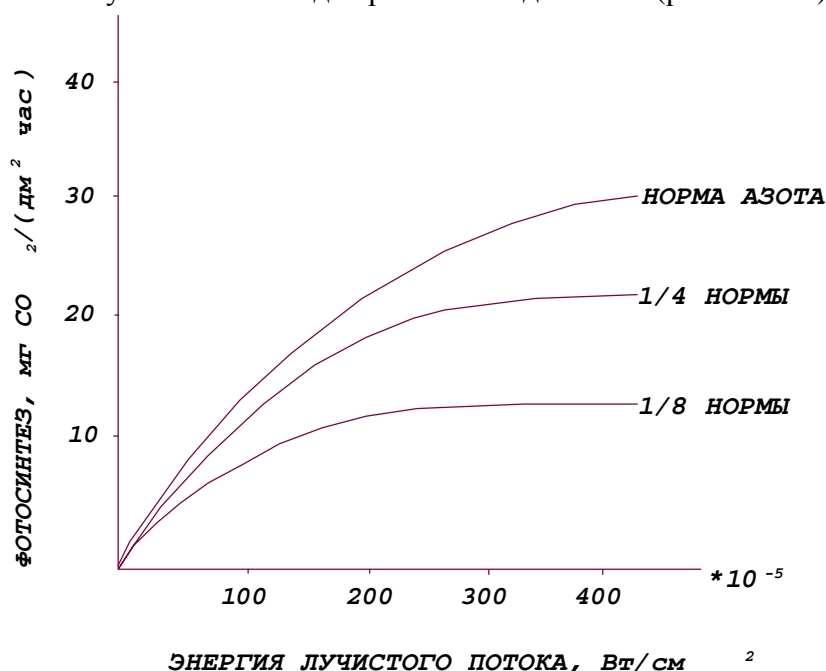


Рис. III.1.10. Световые кривые фотосинтеза при различных дозах азота (по А.Н.Полевому, 1988)

*Определения:*

Фотосинтез зависит от:

интенсивности светового потока (интенсивности освещения) в виде возрастающей логистической функции, где основными параметрами являются начальный угол наклона световой кривой (параметр теневыносливости) и максимальное значение фотосинтеза, мало изменяющее при дальнейшем увеличении световой энергии ( $\Phi_0$ );

- угла падения световых лучей, при перпендикулярном падении которых на поверхность листа фотосинтез максимален;
- спектрального состава света: максимумы интенсивности фотосинтеза приходятся на сине-фиолетовые и красно-оранжевые части спектра;
- температуры воздуха и влажности воздуха в виде одновершинных куполообразных кривых с определенным для каждого вида районированных растений диапазоном оптимума температур и влажностей.

Фотосинтез также изменяется в онтогенезе растений. В качестве параметра физиологического возраста используют сумму эффективных температур воздуха,  $\sum T_{эфф}$ . Зависимость фотосинтеза от этого параметра также носит вид одновершинной «куполообразной» функции.

Интенсивность прироста фотосинтеза определяется действием того физического фактора среды, который наиболее удален по значениям от своего оптимума (модификация закона Либиха). Следует учитывать «компенсирующее» действие других, находящихся не в оптимальных условиях, факторов. При этом рост интенсивности фотосинтеза будет определяться скоростью прироста фактора, наиболее удаленного от оптимума.

Эти положения оказываются весьма важными для изучения практических аспектов агрофизики, в особенности, выращивания растений в закрытом грунте при искусственном освещении, а также при моделировании продукционного процесса.

### Понятие о моделировании процесса фотосинтеза

Для описания процесса фотосинтеза необходимо знать интенсивность фотосинтеза при оптимальных условиях тепло- и водообеспеченности, при реальных условиях освещенности. Обозначим ее потенциальным фотосинтезом -  $\Phi_0$  [мг  $\text{CO}_2/\text{дм}^2 \cdot \text{ч}$ ]. Для пересчета этой величины к реальным условиям ( $\Phi_t$ ) необходимо учесть изменение фотосинтеза для реальных значений температуры и содержания влаги в почве. Примеры таких функций пересчета мы уже знаем, обозначим их как параметры  $a_T$  и  $a_W$ :

$$a_T = \frac{\Phi_t}{\Phi_0} = 0.2 \frac{T - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T} \left[ 6 - \left( \frac{T - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right)^5 \right]$$

$$a_W = \frac{\Phi_t}{\Phi_0} = -a \left( \frac{3B}{3B_{\text{нв}}} \right)^2 + e \left( \frac{3B}{3B_{\text{нв}}} \right)$$

Кроме того, надо учесть изменение фотосинтеза в процессе развития растения, - в онтогенезе. Эта кривая специфична для каждого растения, но мы уже тоже знаем, какие используют для этого подходы: обычно оперируют фактором сумм температур больше  $10^0\text{C}$ . Это позволяет составить специфические для каждого растения функции наступления стадий в процессе онтогенеза в зависимости от конкретно складывающихся метеоусловий года. В расчеты фотосинтеза этот фактор вводится в виде параметра  $a_{ONT}$ .

Тогда для реальных условий развития растения фотосинтез в каждый данный момент будет определяться потенциальным фотосинтезом и параметрами тепло-, водообеспеченности и особенностями изменения фотосинтеза в онтогенезе:

$$\Phi_t = \Phi_0 \cdot a_T \cdot a_W \cdot a_{ONT}$$

Это позволяет рассчитывать фотосинтез для каждого периода времени. Однако наиболее важно знать не просто фотосинтетическую активность, но и формирующийся урожай. А биомасса, т.е. суммарная растительная продукция, будет определяться двумя процессами: фотосинтезом и дыханием.

### Дыхание

Процесс дыхания – это сложный физико-химический процесс, в ходе которого органические вещества, образованные в результате фотосинтеза, окисляются с высвобождением энергии при поглощении кислорода и выделении углекислого газа. Главное предназначение процесса дыхания – это получение энергии, необходимой для жизнедеятельности, а итог - получение таких аккумуляторов энергии как АТФ, выделение  $\text{CO}_2$  и поглощение  $\text{O}_2$ . Весьма схематично процесс дыхания представлен на рис. III.1.11.,

на котором изображены два основных участка процесса дыхания: цикл Кребса и дыхательная цепь, в которой и осуществляется окислительное фосфорилирование.

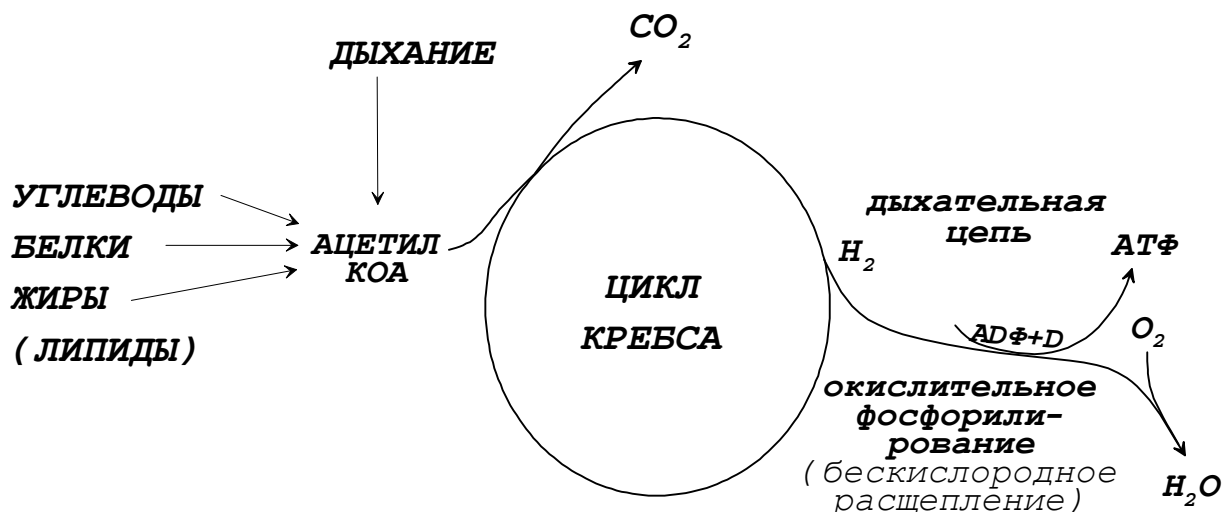


Рис. III.1.11. Схема процесса дыхания (цикл Кребса)

Следует подчеркнуть, что не весь ассимилированный при фотосинтезе углерод тратится на дыхание, а только его часть. Другая его часть, как указывалось, формирует запасы. В свою очередь, углеродсодержащие вещества, расходуются в процессе дыхания. В агрофизике, как правило, используют подход к процессу дыхания, разделяющий общее дыхание на «дыхание роста» (или в дальнейшем, просто «дыхание») и «дыхание поддержания» (см. О.Д.Сиротенко, 1981). «Дыхание роста» определяет прирост сухой биомассы растения (или его органа), а «дыхание поддержания» пропорционально сухой биомассе растения. Этот подход называется «двухкомпонентной концепцией дыхания». Эта концепция удобна тем, что позволяет физически и математически выделить часть сформированных в результате фотосинтеза резервов, которые расходуются именно на рост растения.

#### Определения

**Дыхание** - совокупность процессов, которые обеспечивают поступление в организм кислорода и выделение из него углекислого газа. В процессе дыхания кислород используется для окисления ассимилянтов процесса фотосинтеза с освобождением энергии, необходимой для жизнедеятельности растения.

В агрофизике дыхание рассматривается как двухкомпонентный процесс: **дыхание поддержания** ( $R_m$ ) пропорционально сухой биомассе растения или его органа ( $M$ ), а **дыхания роста** – пропорционально приросту сухой биомассы ( $\frac{dM}{dt}$ ):

$$R_t M = R_m M + (1 - G) \frac{dM}{dt}$$

где  $R_t$  - общее дыхание (г углеводов/г сух.вещества в сутки),  $R_m$  - дыхание поддержания,  $M$  - биомасса сухая растения (г сух.вещества), а  $G$  - коэффициент дыхания роста, характеризующий эффективность преобразования углеводов в сухую биомассу (г углеводов/г сух.биомассы).

В онтогенезе функция дыхания изменяется. Хорошо известны факты более интенсивного дыхания молодых, быстро растущих растений. Кроме того, дыхание существенно зависит от температуры. Так как это процесс в основном физико-химический, то для его характеристики, аналогично скорости химической реакции, вводят

температурный коэффициент дыхания,  $Q_{10}$  – увеличение скорости дыхания при увеличении температуры на 10 градусов. Тогда функция изменения дыхания под влиянием температуры (но без учета онтогенетических изменений) можно записать:

$$R = R_0 Q_{10}^{0.1 \cdot (T - T_0)}, \text{ где } R_0 \text{ и } T_0 - \text{исходное дыхание и температура}$$

В целом, функция дыхания – также одновершинная кривая, аналогичная температурной кривой фотосинтеза. Обе эти кривые представлены на рис. III.1.12. Из приведенного рисунка видно, что разность между продукцией фотосинтеза (формирующимися ассимилянтами) и дыханием дает чистую нетто-продукцию фотосинтеза. Эта нетто-продукция складывается из запасов и структурной биомассы. Кроме того, следует подчеркнуть, что эти кривые не симметричны при изменении температуры. Имеется диапазон температур, при которых фотосинтез происходит наиболее интенсивно, дыхание же не достигает максимума. Это область наиболее эффективного формирования запасов и структурной биомассы. При более высоких температурах дыхание превосходит фотосинтез, – происходит «сгорание» формирующихся при фотосинтезе запасов.

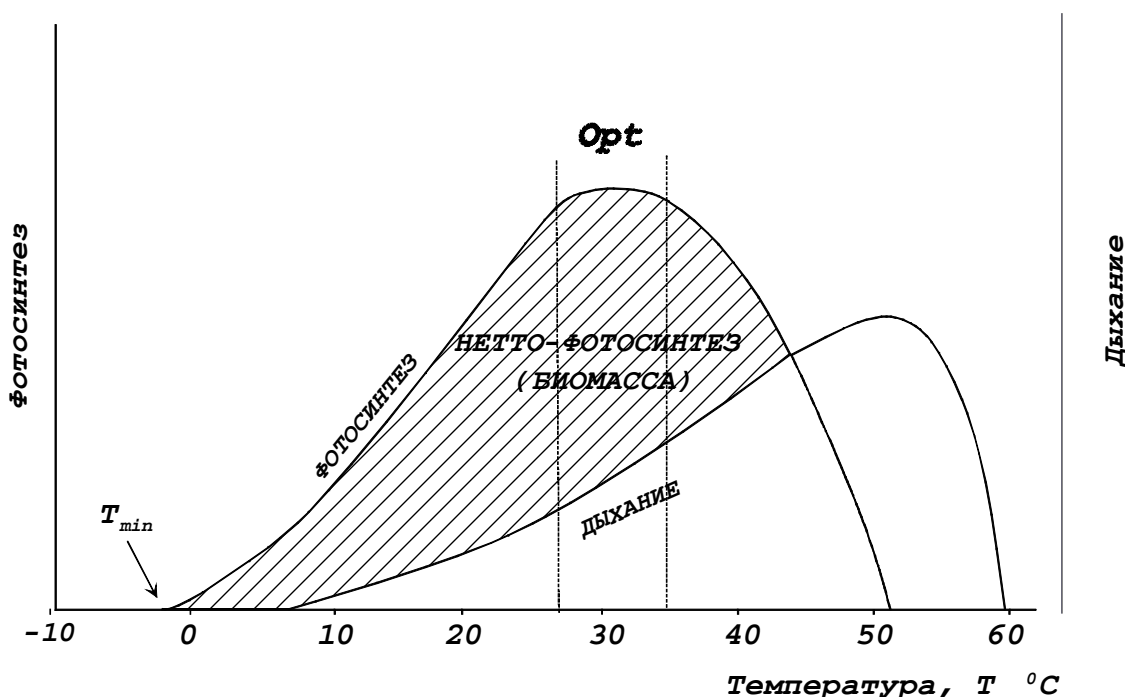


Рис. III.1.12. Температурные кривые дыхания и фотосинтеза (по А.Н.Полевому, 1988).

И, наконец, еще один важный момент: эти кривые очень похожи по форме. Схожесть этих кривых определяется не только тем, что оба эти процесса в основе своей физико-химические, но и тем (что очень важно!), что они взаимосвязаны. Так дыхание роста можно рассматривать пропорциональным фотосинтезу посевов, а дыхание поддержания – биомассе посева, которая, в свою очередь, зависит от температуры и возраста растений.

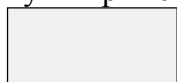
Таким образом, основными действующими факторами при количественном физически-обоснованном описании процессов фотосинтеза, дыхания, и соответственно роста и развития, выступают такие факторы среды, как температура воздуха, влажность почвы – факторы непосредственно влияющие на интенсивность процессов в растении. Фактор изменения основных физиологических процессов в онтогенезе растений также учитывается в виде суммы эффективных температур, которая оказывается тесно связанной с наступлением соответствующих фаз развития растений.

### Системное представление процессов дыхания и фотосинтеза

Итак, в процессе фотосинтеза, образующиеся первичные углеводы вместе с минеральными веществами, формируют все разнообразие органических веществ растения. Есть три пути расходования образующихся углеводов: часть их расходуется на дыхание и другие энергетические процессы в растении, такие, например, как активный транспорт, синтез аминокислот, белков и пр. Эти процессы составляют в целом процесс дыхания. Другая часть формирует запасы, или то, что мы называем «биологический урожай». И, наконец, третья часть формирует структурную биомассу. Структурная биомасса, в отличие от резервов, состоит из таких элементов (клетчатка), которые не расходуются для процессов роста в каких-либо других частях растения. Поэтому, интенсивность накопления растительной продукции – это разность, между интенсивность фотосинтеза и суммарного дыхания. Этого мы еще коснемся в части «Рост и развитие».

Для того чтобы описать процесс фотосинтеза, можно воспользоваться просто приведенными выше зависимостями фотосинтеза от температуры, интенсивности света и пр. Так в большинстве случаев и поступают. Возможен и другой путь, - представление всех этапов фотосинтеза в виде отдельных процессов, а влияние внешних физических факторов (температуры, интенсивности света и пр.) будет учитываться на различных этапах этого процесса. Такой путь, хоть он и более сложный, нередко используется, так как считается физически более обоснованным. Для осуществления этого пути следует иметь представление о структуре модели.

Для того, чтобы представить все возможные связи и процессы мы должны графически представить все связи и отношения между переменными (как внешними условиями, так и переменных состояния самого растения). Для этого сначала составляют качественную системную схему модели или потоковую диаграмму. Учитывая, что мы описываем сложные взаимосвязанные процессы, необходимо использовать принятые обозначения в моделировании со времен одного из основоположников этого метода в естествознании Дж.Форрестера (Forrester J.W., 1961). Он предложил составлять системные потоковые диаграммы, а А.А.Ляпунов и А.А.Титлянова обосновали определенный «графический язык» для изображения потоковых диаграмм. На таких системных потоковых диаграммах прямоугольник – это символ переменной состояния, клапан – регулятор потоков, окружность – вспомогательные переменные, сплошные линии – потоки веществ, а пунктирные – потоки информации, т.е.



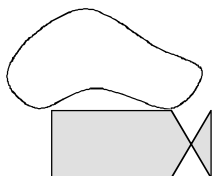
— переменная состояния;



— поток вещества, в результате которого изменяется величина или переменная состояния;



— направление движения информации;



— источник или сток веществ на границах системы;

— знак «клапан». Указывает, что в этом месте принимается решение.

Практически в этом месте необходимо описание потока в виде математического уравнения. Пунктирная линия указывает, от каких факторов зависит это решение

Вот этот подход и изображен весьма схематично на рис. III.1.13.

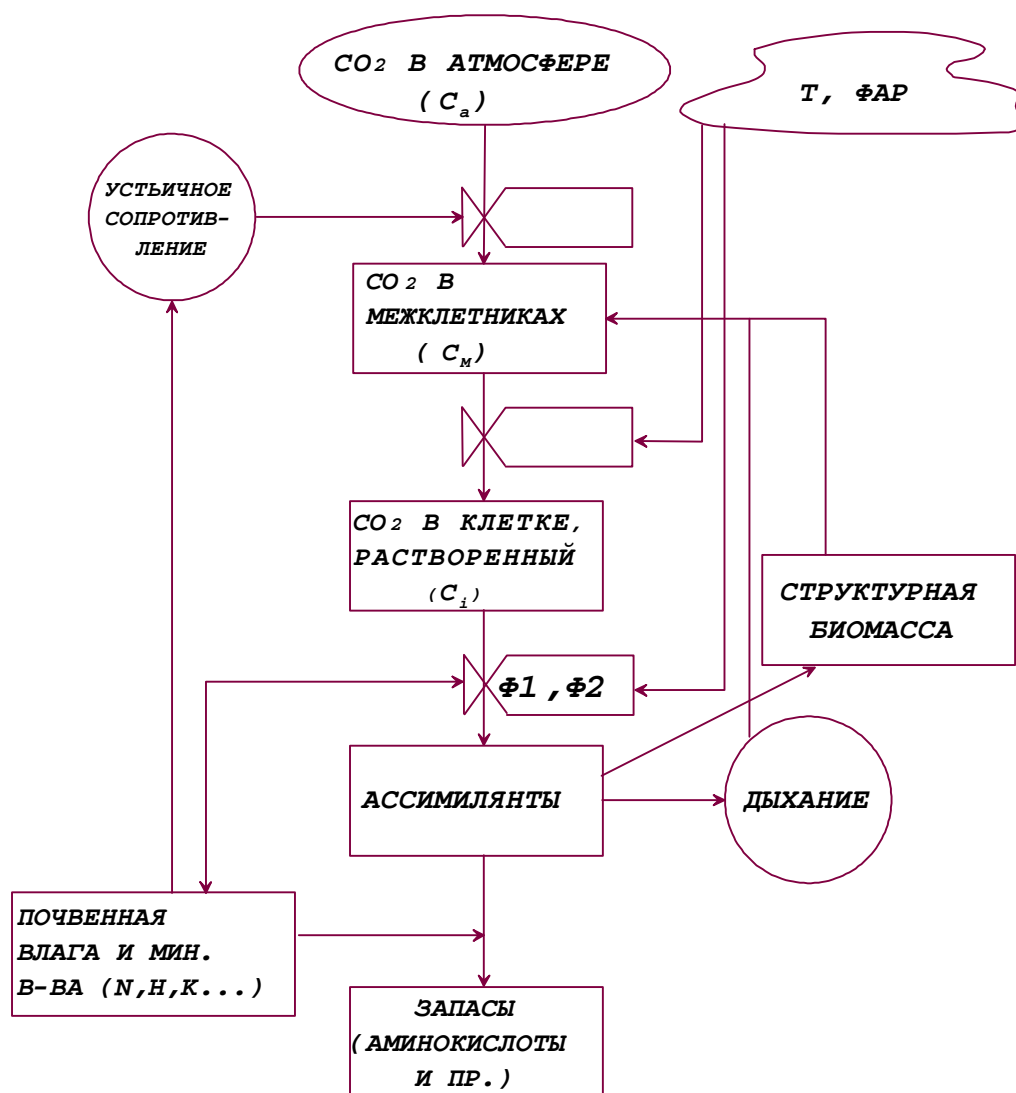


Рис. III.1.13. Потокосная диаграмма процесса фотосинтеза.

Изначально, углекислый газ атмосферы диффундирует через открытые устьица. В целом, это действительно процесс диффузии, так как концентрация CO<sub>2</sub> в межклетниках ( $C_{м-к}$ ) ниже чем в атмосфере ( $C_a$ ) за счет постоянного отбора на фотосинтез. Поэтому этот процесс можно описать простым диффузионным уравнением, типа  $G = K_{устыиц} (C_a - C_{м-к})$ , где  $G$  – интенсивность газообмена между атмосферой и внутренней полостью листьев (межклетниками), а  $K_{устыиц}$  – это газопроводность устьиц. На интенсивность этого процесса будет, в основном, влиять водное питание растений, так как именно оно определяет степень открытия устьиц, а следовательно и величину  $K_{устыиц}$ . К сожалению, не предложено физически обоснованных уравнений процессов в световой фазе фотосинтеза ( $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$ ). На темновой фазе также. Поэтому пользуются теми самыми видами зависимости влияния действующих физических факторов на отдельные этапы фотосинтеза и на процесс в целом, которые приведены выше. Образующиеся углеводы далее формируют запасы (в виде аминокислот и других органических веществ). Это отражено на схеме в виде оттока ассимилянтов в блок «Запасы». Другие стрелочки из блока «Ассимилянты» направлены в блоки «Дыхание» и «Структурная биомасса», т.е. ассимилянты расходуются на дыхание и на создание структурной биомассы. «Структурная биомасса» представляет формообразующие вещества в виде клетчатки это видно на схеме в виде стрелок, направленных из блока «Ассимилянты» в блоки «Дыхание» и «Структурная биомасса». Это общая потоковая схема системно

представляющая весь процесс фотосинтеза. При выражении указанных стрелочками потоков в виде математических уравнений, возможно создание комплексной математической модели фотосинтеза растений.

В целом, нередко удается с помощью указанных уравнений и зависимостей достаточно надежно описать процесс фотосинтеза для СЗ- растений. Моделирование этого процесса, его близость к реальному описана в работах известных агрофизиков Н.Ф.Бондаренко с соавторами (1982), Р.А.Полуэктова (1993) и других (см. Литература)

#### Литература

- 1 Бондаренко Н. Ф., Е. Е. Жуковский, И. Г. Мушкин, С. В. Нерпин, Р. А. Полуэктов, И. Б. Усков. Моделирование продуктивности агроэкосистем. Л. Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
- Основы агрофизики. Физматгиз. М.: 1959
- Полуэктов Р. А. Динамические модели агроэкосистем.. СПб, Гидрометеиздат. 1993. 310 с.
- Полевой А. Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. Л.:Гидрометеиздат, 1988. 319 с.
- Сиротенко О. Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем. Л.:Гидрометеиздат. 1981. 163 с.
- Шульгин И. А. Солнечная радиация и растение. Л.:Гидрометеиздат. 1967. 179 с.

## Глава III.2. Растение и вода

### Понятие о влагообеспеченности растений. Транспирация.

Два основных процесса в растениях, - фотосинтез и транспирация, тесно взаимосвязаны: если транспирация, представляющая собой поток воды через устьица растений, понизится за счет недостатка почвенной влаги и последующего прикрытия устьиц, то снизится и фотосинтез за счет, прежде всего поступления  $\text{CO}_2$  в лист. Поэтому транспирация и продуктивность растений тесно скоррелированы. Отметим также, что количество воды для фотосинтеза несравненно ниже транспирируемого (от 2 до 10% общего количества потребляемой растением влаги), и обычно его не учитывают при изучении закономерностей формирования потока влаги в системе «почва-растение-атмосфера».

Зависимость водопотребления и урожая позволяет вводить ряд показателей взаимосвязи продукции растений и их водного обмена. В частности, для сравнения различных видов растений по их потребности во влаге используют транспирационные коэффициенты - количество влаги, расходуемое растением для формирования 1 г зеленой массы. Этот коэффициент отражает эффективность использования влаги растением, его способность экономно потреблять влагу при формировании зеленой биомассы. А вот коэффициент водопотребления, который следует отличать от транспирационного коэффициента, представляет собой количество воды, необходимое для создания единицы массы урожая. Естественно коэффициенты водопотребления всегда выше транспирационных коэффициентов, что и отражено в табл.1.

Табл. III.2.1.

Транспирационные коэффициенты и коэффициенты водопотребления некоторых сельскохозяйственных растений

Коэффициенты	Сельскохозяйственные культуры			
	Пшеница	Кукуруза	Сахарная свекла	Сорго
Транспирационный	505	372	601	271
Водопотребления	1350	790	1450	598

Из табл. III.2.1 совершенно отчетливо видно, что наиболее засухоустойчивые культуры очень экономно расходуют влагу: и транспирационные коэффициенты, и коэффициенты водопотребления кукурузы и сорго значительно ниже, чем пшеницы и сахарной свеклы. Однако указанные коэффициенты в большей мере являются характеристиками водного питания растений, отражающими эволюционные и экологические особенности растений, но мало применимы для оперативного управления водным режимом растений. Для этого оказываются более полезными термодинамические подходы к описанию влагопотребления растений. А основным показателем влагообеспеченности будет являться поток влаги через растение, т.е. транспирация.

Для описания транспирации растений используют несколько выражений:

#### Определения

**Транспирация** ( $T_r$ , см/сут,  $\text{г H}_2\text{O}/\text{г сух.в-ва}$  сут) – испарение растениями в атмосферу парообразной влаги в процессе их жизнедеятельности. Транспирация характеризуется количеством влаги, которое выделяется определенной массой или площадью (1 г или  $1 \text{ см}^2$ ) сырых (или сухих) листьев в единицу времени. Поэтому наиболее распространенные размерности – см/сут, мм/час и др., аналогичные размерностям испарения, интенсивности осадков, впитывания влаги, фильтрации и других видов потоков влаги.

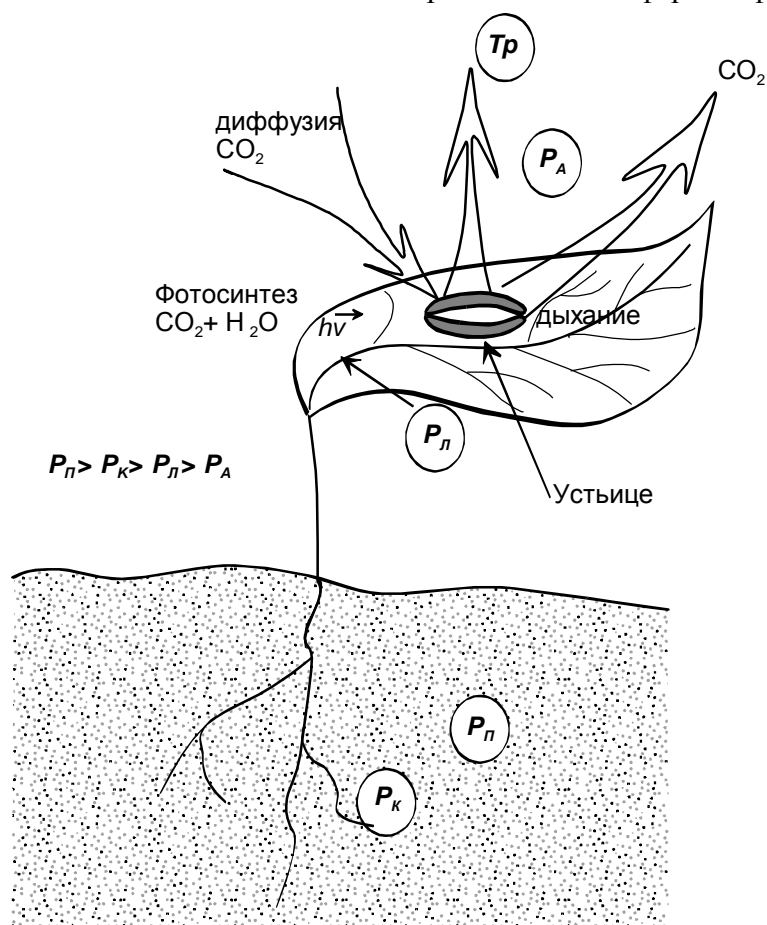


**Транспирация актуальная** ( $Tr$ , см/сут) – измеряемая в данный момент времени при конкретных метеорологических и почвенных условиях.

**Транспирация потенциальная** ( $Tr_0$ , см/сут) – количество воды, транспирируемое в единицу времени зеленой низкорослой культурой, полностью затеняющей почву, выровненной по высоте и не испытывающей недостатка в почвенной влаге (влажность почвы в диапазоне от НВ до  $\approx 0.7$  НВ).

**Транспирация относительная** ( $Tr/Tr_0$ , безразмерная) – отношение актуальной к потенциальной. Является показателем влагообеспеченности растений: считается, что при относительной транспирации менее 1, растение страдает от недостатка почвенной влаги.

Как показатель влагообеспеченности растений наиболее удобен безразмерный параметр – относительная транспирация. Его-то мы и будем использовать в качестве основной характеристики водообеспеченности растений. Рассмотрим описание процесса движения влаги в системе «почва-растение-атмосфера» в физических терминах.



**Рис. III.2.1.** Движение влаги в системе «почва-растение-атмосфера» и основные процессы в растениях.

### **Термодинамический подход к описанию передвижения влаги в системе «почва-растение-атмосфера»**

Для описания этого переноса вполне можно применить понятие потенциала влаги для различных частей системы и основное уравнение переноса влаги. Следует только учесть, что в данном случае используются величины полных давлений (потенциалов) влаги: полное давление влаги в почве ( $P_п$ ), в корне ( $P_к$ ), в листе ( $P_л$ ) и в атмосфере ( $P_A$ ). Рассмотрим распределение этих давлений в рассматриваемой системе (рис. III.2.1.). Движение влаги из почвы через растение в атмосферу возможно лишь в случае, если

будет выполняться условие  $P_n > P_k > P_l > P_a$  (с учетом отрицательного знака давления влаги). За счет перепада давлений влаги в почве и корне ( $P_n - P_k$ ) будет формироваться подток почвенной влаги к корням растений ( $q_w$ ). За счет перепада между корнем и листом ( $P_k - P_l$ ) – поток влаги к листьям, а перепад давлений влаги между листом и атмосферой ( $P_l - P_a$ ) определяет поток парообразной влаги из лада в атмосферу, т.е. транспирацию ( $Tr$ ). Вполне понятно, что водный поток в данной системе одинаков во всех ее частях, и  $q_w = Tr$ . Физические основы регулирования потока влаги в системе «почва-растение-атмосфера» следующие.

Происходит все следующим образом (рис. III.2.2.). Вначале, когда давление влаги в почве высоко, транспирация находится на высоком уровне ( $Tr/Tr_0 = 1$ ). Затем, в процессе потребления влаги корнями растений, давление влаги в почве начинает снижаться, и поток к листьям временно упадет. Это вызовет увеличение концентрации веществ в клетках листьев и снижение осмотического, и соответственно, полного давления влаги в листьях. Перепад давлений влаги почва-лист увеличивается, и транспирация продолжает находиться на первоначальном уровне. Почва продолжает иссушаться, однако растение еще способно понижать давление влаги в листьях, увеличивая перепад давлений между почвой и листом и восстанавливая оптимальный поток влаги из почвы к корням и в листья. На рис. III.2.2 – участок оптимальной влагообеспеченности растений, когда с уменьшением давления влаги в почве, возрастает перепад давлений  $P_n - P_l$  и  $Tr/Tr_0$  находится на уровне, близком к 1. При достижении некоторого «критического» давления влаги в почве, несмотря на продолжающийся рост перепада давлений «почва-лист» транспирация начинает уменьшаться вследствие уменьшения подтока влаги к корням. Основной причиной уменьшения потока является стремительное снижение коэффициента влагопроводности почвы.



**Рис. III.2.2.** Изменение относительной транспирации ( $Tr/Tr_0$ ), перепада давлений влаги между почвой и листом ( $P_n - P_l$ ) и коэффициента влагопроводности ( $K_{вл}$ ) в процессе иссушения почвы, при уменьшении давления влаги в почве ( $P_n$ ).

При дальнейшем иссушении почвы давление почвенной влаги продолжает падать, интенсивно (на порядки!) уменьшается проводимость и, соответственно, подток влаги к корням. Даже некоторый рост перепада давления  $P_n - P_l$  не способен компенсировать падение влагопроводности почвы и увеличить подток к корню. Транспирация продолжает снижаться вплоть до очень низких значений, до завядания растений. Основным фактором регулирующим водное питание растений будет являться давление почвенной влаги, а

параметром его характеризующим – «критическое» давление влаги в почве. Эти процессы детально рассмотрены в монографиях И.И.Судницына (см. Литературу).

### Критическое давление влаги в почве. Научные основы регулирования водного питания растений

Поскольку водообеспеченность растений, в конечном счете, зависит от давления влаги в почве, то для того, чтобы характеризовать водное питание конкретных растений в конкретных почвенных условиях, надо найти зависимость между относительной транспирацией и давлением влаги в почве. Причем, в данном случае можно использовать не полное давление влаги, а капиллярно-сорбционное, так как именно от него зависит влагопроводность почвы и поток влаги к корням. Эта зависимость будет характеризовать процесс водного питания растений во всем диапазоне давлений влаги вне зависимости от метеорологических факторов. На рис. III.2.3 в общем виде представлена зависимость между относительной транспирацией ( $Tr/Tr_0$ ) и капиллярно-сорбционным давлением влаги в единицах  $pF$ . По своему виду она и получила название – «транспирационная трапеция». Рассмотрим ее более внимательно.

Эта зависимость имеет несколько характерных точек. Две из них относятся к очень низкой (близкой к нулевой) транспирации: на рис. III.2.3 точки пересечения «транспирационной трапеции» с осью  $pF$ . Последняя на оси  $pF$  нам знакома – это точка устойчивого завядания растений. Первая же, в начале координат, отражает условия полного насыщения почвы водой. Основная масса сельскохозяйственных растений – мезофиты, и обычно они не способны переносить недостаток воздуха в почве. При недостатке воздуха в почве их транспирация близка к нулю. Удивительно, но факт, - переувлажнение действует на растение аналогично почвенной засухе: уменьшается общее влагосодержание листьев. Физиологи объясняют это воздействие анаэробноза тем, что при недостатке воздуха блокируется система корневого питания растений, что снижает и транспирацию, и продуктивность растений.

По мере иссушения почвы и появления в ней все большего количества воздуха относительная транспирация все увеличивается, достигая значения, равного единице – а это условия оптимальной водообеспеченности растений.



Рис. III.2.3. «Транспирационная трапеция».

Указанная точка перелома на транспирационной трапеции соответствует давлению входа воздуха в почвенное поровое пространство, или давлению барботирования ( $P_6$ ). В этот момент капиллярные силы в крупных капиллярах уже не способны удерживать воду,

вода выходит (дренируется) из этих капилляров, и в почве в достаточном для растений количестве появляется воздух. Для многих суглинистых почв эта величина, находится в диапазоне -35 - -70 см водн. ст., но может колебаться в заметных пределах в зависимости от свойств почв.

Следующая область транспирационной трапеции – плато на уровне  $Tr/Tr_0$ , близком к 1. Эта область оптимальной обеспеченности растений почвенной влагой. В данной области устьица растений максимально открыты, растение способно активно регулировать свой водообмен на высоком уровне, повышая давление влаги в листьях и, соответственно, в корнях. Но, как мы указывали выше, лишь до определенного уровня. Этот уровень – вторая точка перелома на транспирационной трапеции. Ей соответствует значение «критического» давления влаги в почве ( $P_{кр}$ ). Весьма важная во всех отношениях величина. В теоретическом – именно при достижении «критического» давления прикрываются устьица, и растение вынуждено перестроить свой физиологический механизм на экономию влаги, не наращивая активно вегетативную массу. В практическом – при определении (наступлении) в почве указанной величины следует производить полив растений. Это основа для практики оросительных мелиораций. Для большинства растений-мезофитов  $P_{кр}$  колеблется от -300 до -600 см водн. столба, т.е. от 2.5 до 2.78 единиц рF.

Последняя часть транспирационной трапеции – снижение  $Tr/Tr_0$  от 1 до небольших величин – отражает процесс постепенного закрытия устьиц, ухудшения водного питания вплоть до прекращения транспирации и гибели растений. Строго говоря, нулевого значения транспирация растений не достигнет, даже в сухом состоянии через растение, как через пористый безжизненный фитиль, будет двигаться слабый поток из почвы в атмосферу. Но это уже не физиологический процесс транспирации, а чисто физический процесс.

Указанные точки характеризуют области практического управления водным питанием растений. Область давлений влаги от 0 до  $P_0$  (от полного насыщения до давления входа воздуха) – область осушительных мелиораций, когда из почвы требуется убрать избыток воды с помощью дренажа. Область давлений влаги ниже критического – область обводнительных мелиораций, когда требуется следить за давлением влаги в почве и подавать воду при наступлении критического давления влаги. Постоянно же следить за давлением влаги в почве можно с помощью тензиометров, и в момент достижения  $P_{кр}$  осуществлять полив.

Данный подход составляет научные основы управления водным питанием растений. Конечно, растение нельзя рассматривать просто как пассивную гидравлическую систему. Пример тому - отмеченный факт снижения корневого питания при недостатке аэрации почвы, который управляется ферментативными реакциями. Но приведенный подход при учете его схематичности и простоте представляется удобным, для управления водообеспеченности растений используя параметр «критического давления». Для этого, необходимо еще знать от каких факторов, и в какой степени зависит  $P_{кр}$ .

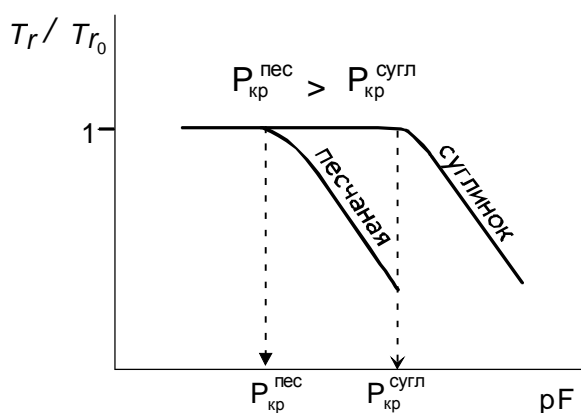
### **Зависимость критического давления от различных факторов**

При оценке изменения  $P_{кр}$  под действием различных факторов следует помнить, что величина  $P_{кр}$  определяет подток влаги к корням растений, в основном, через снижение влагопроводности почвы. Иначе говоря, следует учитывать и функцию влагопроводности при рассмотрении явления влияния почвенных факторов на величину  $P_{кр}$ .

#### **• Почвенные факторы**

Величина  $P_{кр}$  будет снижаться при утяжелении гранулометрического состава (рис. III.2.4). Это объясняется различием в виде функций влагопроводности для песчаных и суглинистых почв. Вспомним, что коэффициент влагопроводности для области давлений влаги – 300 – -600 см водн. столба для суглинистых почв выше, чем для песчаных. Следовательно, и поток влаги к корням растений в суглинистой почве будет

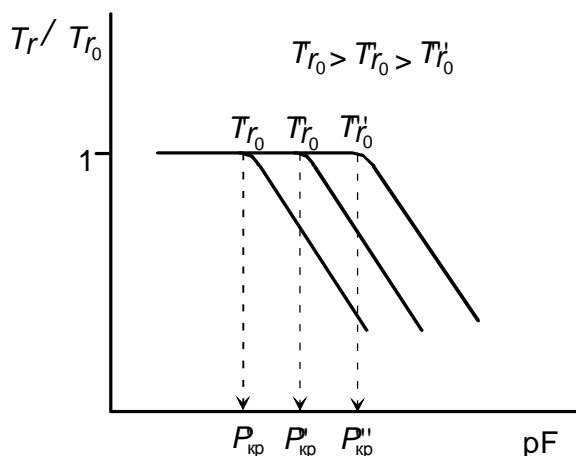
выше при одном и том же давлении влаги. Поэтому, растение начнет снижать транспирацию в суглинистых почвах при более низком давлении влаги. В суглинистых почвах имеется более широкий диапазон оптимального водного питания растений, что связано, в основном, с особенностями функции влагопроводности для почв различного гранулометрического состава.



**Рис. III.2.4.** Изменение «критического» давления влаги в почве в песчаных и суглинистых почвах.

- Метеорологические

Метеорологические факторы учитываются в величине  $Tr_0$ : чем больше скорость ветра, сухость атмосферы, тем выше  $Tr_0$ . Казалось бы, метеоусловия, их напряженность, не должны оказывать влияния на вид транспирационной трапеции. Однако, как видно на рис. III.2.5, при увеличении напряженности метеоусловий растения начинают снижать транспирацию раньше, при большей (с учетом знака) величине капиллярно-сорбционного давления влаги в почве.



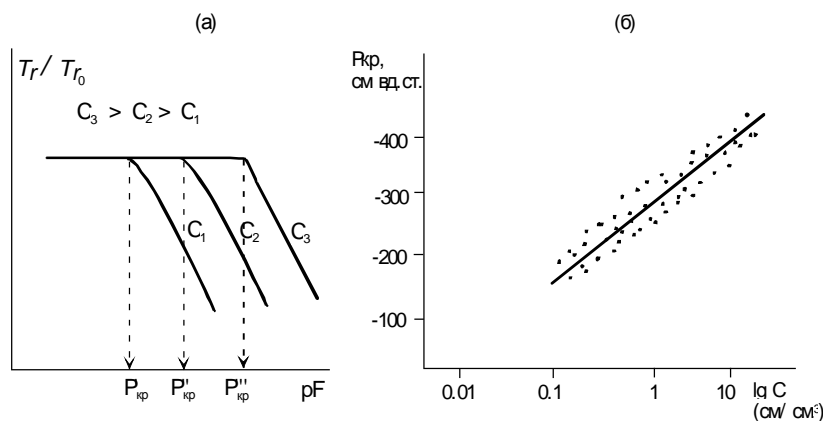
**Рис. III.2.5.** Изменение критического давления влаги при различной напряженности метеоусловий.

Указанная зависимость  $P_{кр}$  от метеоусловий связана, прежде всего, с определенной «инерционностью» растений по сравнению с изменением метеоусловий. В природе нередко при суховеях наблюдается завядание растений при полном достатке воды в почве: так называемая «атмосферная засуха». При резком увеличении сухости воздуха растения не «успевают» прикрыть устьица и восстановить поток от почвы к листьям. Происходит быстрое обезвоживание листьев, завядание растений при достатке влаги в почве, когда значения  $pF$  еще невелики.

- Биологические

Вполне понятно, что биологические особенности растений в отношении их засухоустойчивости, будут совершенно определенно связаны с  $P_{кр}$ : для ксерофитов будут свойственны самые низкие величины  $P_{кр}$ , гигрофитам – самые высокие, а мезофиты будут занимать промежуточное положение. В данном разделе мы кратко остановимся лишь на вопросе влияния концентрации корней на величину  $P_{кр}$ .

Корневые системы исследовать весьма сложно. Но в традициях почвоведов для характеристики условий жизнедеятельности растений всегда оценивать массу или длину корней. В данном случае, учитывая, что корни потребляют влагу по всей своей длине, будем пользоваться концентрацией корней в виде «длина корней в единице объема почвы»,  $[см/см^3]$ . Исследования показали, что при увеличении концентрации корней,  $P_{кр}$  снижается (рис. III.2.6, а), т.е. растений с более развитой корневой системой при прочих равных условиях имеют более широкий диапазон оптимального водного питания. Более того, сама величина  $P_{кр}$  связана с концентрацией корней в определенном диапазоне характерной, близкой к степенной зависимости, которая в полулогарифмических координатах близка к линейной (рис. III.2.6, б).



**Рис. III.2.6.** Изменение  $P_{кр}$  при различной концентрации корней (а) и близкая к линейной зависимость  $P_{кр}$  от концентрации корней ( $C$ ,  $см/см^3$ ).

Такой вид зависимости однозначно указывает, что в определенном диапазоне концентраций корней рост корневых систем будет способствовать улучшению водного питания растений, о чем, впрочем, говорит весь опыт практического земледелия, лесоводства. Более подробно о факторе роста корней и методах их исследования – в главе «Рост и развитие».

### Взаимосвязь водного питания растений, фотосинтеза, роста и продуктивности растений.

#### Системный подход при анализе влагообеспеченности

Все процессы, связанные с водообеспеченностью растений можно проследить на рис. III.2.7, на котором представлена потоковая диаграмма взаимосвязи транспирации с фотосинтезом и продукционными процессами. На этой схеме совершенно ясно видно, что взаимосвязь процессов в растении происходит через устьичную активность, связанную с освещением, теплом, влажностью воздуха в атмосфере. Больше интенсивность освещения – шире устьица (процесс фотоактивного открывания устьиц). Устьица, как известно, состоят из двух замыкающих полукруглых клеток, тургор которых определяет их открытость или ширину устьичной щели. Выше тургор – шире отверстие устьиц. Поэтому

на схеме представлена информационная стрелка от «Содержания воды в клетке», определяющая тургоресцентность (а значит и открытость) устьиц. Еще одна стрелка направлена в «Устьичную регуляцию» от «Фотосинтеза». Эта взаимосвязь фотосинтеза и открытости устьиц регулируется концентрацией  $\text{CO}_2$  околоустьичной полости. Если концентрация  $\text{CO}_2$  снижается, - устьица открываются. Поэтому, при восходе солнца, при активизации процесса фотосинтеза, увеличении потребления  $\text{CO}_2$  из межклетников и околоустьичной полости обязательно приведет к открыванию устьиц. Именно этот механизм определяет ночное закрывание устьиц и их открывание при проявлении процесса фотосинтеза, а не только водный механизм, связанный с водообеспеченностью и тургоресцентностью устьичных клеток, описанный выше.

Вполне понятны и потоковые стрелки, направленные из «Устьичной регуляции» к «Фотосинтезу» и «Транспирации»: выше устьичная активность, выше фотосинтез и транспирация. Фотосинтез, как мы уже знаем, связан с формированием «Запасов», которые определяют «Дыхание поддержания» и формирование «Структурной биомассы» в виде структурных растительных формирований: листьев, стебля и пр., состоящих в основном из клетчатки. Формирование структурной биомассы, как продукта фотосинтеза, также будет оказывать влияние на содержание  $\text{CO}_2$  в межклетниках, а значит и на устьичную регуляцию (стрелка от «СТРУКТУРНОЙ БИОМАССЫ» к «Устьичной регуляции»). Важна и стрелка потока влаги от «Почвенной влаги» к «Транспирации». Ее мы рассматривали выше, физически описывая формирование потока влаги из почвы, в корень, в лист и из ластва в атмосферу.

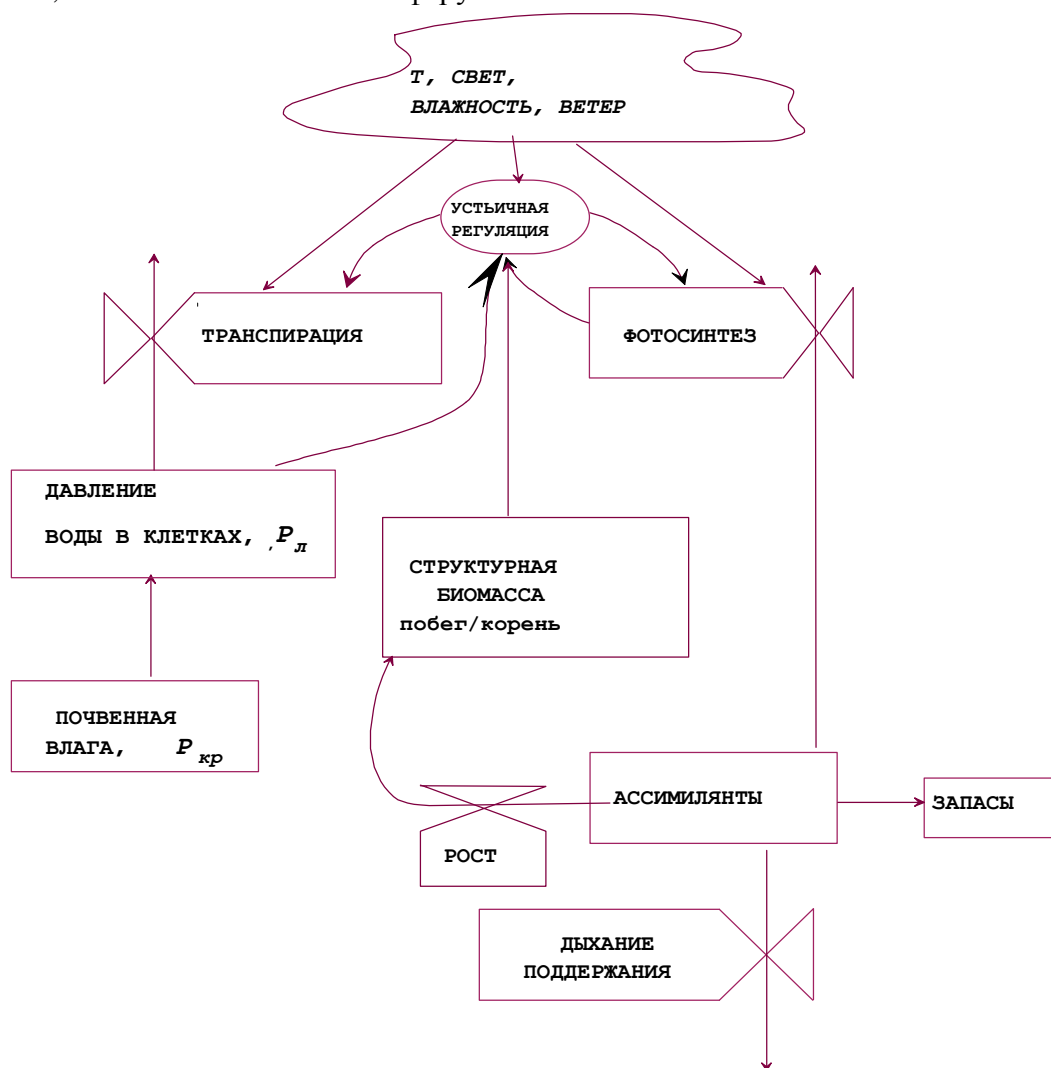


Рис. III.2.7 Схема взаимосвязи процессов транспирации, фотосинтеза, дыхания поддержания, формирования биомассы в зависимости от влагообеспеченности растений

Формально все эти взаимоотношения приводят к зависимости урожая от запасов влаги.

### Взаимосвязь почвенной влаги и урожая растений

Традиционно и в агрометеорологии, и в агрофизике используют не только давление влаги, но и запасы влаги в единицах высоты водного слоя (см водн.сл.). Это оказывается удобным при балансовых способах оценки влагообеспеченности растений, при расчетах запасов влаги доступной для растений в определенной толще почвы, динамики этих запасов по данным о суммарной эвапотранспирации, которая также выражается в см водн.сл. за определенный период. Об использовании агрометеорологических методов расчета влагообеспеченности уже указывалось в части II в главе по «Агроклиматическим условиям», в которой рассматривались подходы А.М.Алпатьева, М.И.Будыко и С.И.Харченко по оценке влагообеспеченности по метеопараметрам. В данном разделе рассмотрим оценку влагообеспеченности по запасам влаги в почве.

На рис. III.2.8 представлены зависимости урожая от запасов влаги в метровом слое почвы. Вид этих зависимостей – весьма характерный, имеющий оптимум в некотором диапазоне количества почвенной влаги. Теоретически вид этой кривой определяется рассмотренной выше транспирационной трапецией: оптимум транспирации приходится на некоторую область давлений влаги в почве. Учитывая, что транспирация строго скоррелирована с фотосинтезом, следовательно, и зависимости урожая от запасов почвенной влаги также будут иметь определенный оптимум.

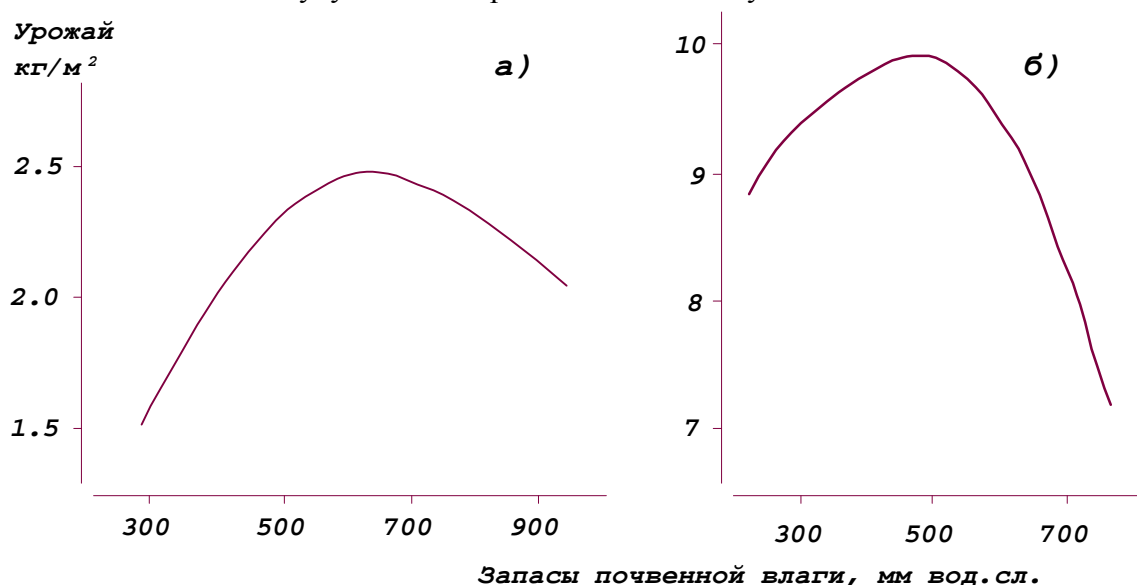


Рис. III.2.8. Зависимость урожая томатов (а) и перца (б) от запасов влаги в метровой толще почвы.

Для ориентирования в величинах оптимальных диапазонов влаги используют не общие запасы влаги, а запасы продуктивной влаги, как разницу между запасами при НВ и ВЗ. Характерные величины оптимальных, допустимых и не рекомендуемых запасов продуктивной влаги в различные фазы развития, представлены в табл III.2.2.

Табл. III.2.2.

Оценка запасов продуктивной влаги для произрастания сельскохозяйственных культур (по В.В.Медведеву и др, 2002\*)

Рассматриваемый почвенный слой и фаза развития	Запасы продуктивной влаги (НВ-ВЗ), (мм водн.сл.)		
	Оптимальные	Допустимые	Не рекомендуемые
В слое 0-20 см при	>30	10-30	<10



появлении всходов			
В слое 0-100см при цветении формировании генеративных органов	>120	60-120	<60

### Улучшение влагообеспеченности растений. Эффективность водопотребления растений

Обычно, в качестве основного параметра, характеризующего эффективность использования растением влаги, используют отношение массы сухой растительной продукции (урожая,  $Y$ ) к суммарной эвапотранспирации ( $E_s$ ). Обозначим это отношение, как эффективность водопотребления растений ( $ЭВР$ )

$$ЭВР = \frac{\text{биомасса(сухая)}}{\text{эвапотранспирация}} = \frac{Y}{E_s}$$

Эта величина может быть выражена как в кг/мм водн.сл., так и в т/га/м<sup>3</sup>/га, т.е. в т/м<sup>3</sup> или в т(сухого вещества)/т(воды), и т.д. Эта последняя размерность показывает близость ЭВР к понятию транспирационного коэффициента, который, вспомним, есть количество воды, необходимое для создания одного грамма веществ, Кт. Отличие лишь в том, что понятие эффективности включает в себя и непроизводительные, неэффективные потери воды в виде испарения с поверхности почвы, которые необходимо уменьшить. Это один из явных путей увеличения эффективности использования воды. Кроме того, величина ЭВР тесно связана с эффективностью использования растением солнечной радиации. А это уже процессы, обусловленные особенностями фотосинтеза в растениях, использования ими различных частей спектра и пр. Но числитель, «биомасса», есть результат в основном двух процессов «фотосинтез-дыхание» с учетом потерь биомассы от различных вредителей. А вот знаменатель – величина зависящая также от солнечной радиации и водного питания растений, от доступности почвенной влаги. Следовательно, направление по повышению эффективности водопотребления растения включает в себя биологическое направление по улучшению потребления растениями солнечной энергии и повышение доступности почвенной влаги. В связи с этим формируются направления по селекции более продуктивных видов растений. Вместе с тем, более насущным являются разработки по снижению водного стока с полей, увеличению влагоемкости корнеобитаемого слоя почвы, снижению непроизводительных потерь на испарение (мульчирование, рыхление поверхности и др.). Эти мероприятия включают также способы размещения культур (рядки, ширина рядков, расстояния в рядках и пр.), плотность посевов, дата посева, интенсивность развития листьев. Вариантов для управления оказывается чрезвычайно много. Поэтому, прежде чем рассматривать разнообразные способы управления эффективностью водных ресурсов на сельскохозяйственных полях, попытаемся исследовать этот вопрос теоретически, как предлагал Франк Вайетс (Frank G.Viets, 1981). Зависимости эффективности водных ресурсов и эвапотранспирации при росте урожая могут быть нескольких видов (рис. III.2.9). На рис. III.2.9, а1 представлена характерная зависимость увеличения эвапотранспирации при пропорциональном увеличении урожая. Этот путь оказывается не слишком эффективным: ЭВР постоянен (рис. III.2.9, а2) при таком пропорциональном росте. Явление это скорее относится к одиноко стоящим растениям, или растениям, выращиваемым в лизиметрах с предохранением поверхности почвы от испарения. Второй рис. III.2.9 (рис. III.2.9, б1): увеличение урожая не приводит к росту эвапотранспирации, - это описание водопотребления риса, для выращивания которого вопросы об эффективности использования почвенных водных ресурсов не стоят. Поэтому увеличение ЭВР при увеличении урожая хоть и оказывается чрезвычайно неэффективным, но для случая с

рисом это единственный выход. Другая ситуация: водопотребление с поля после посева (рис. III.2.9, в11). Сначала на поверхности почвы нет растений (начальный участок на рис. III.2.9, в1). В этот момент испарение происходит только с поверхности почвы, а затем растения начинают транспирировать, и с ростом биомассы стабилизируется эвапотранспирация. Эффективность использования воды увеличивается (рис. III.2.9, в2). Это благоприятная ситуация, указывающая, что эффективность повышается за счет использования солнечной энергии, - наиболее эффективный путь повышения урожая. И, наконец, наиболее реалистичная ситуация (рис. III.2.9, г1). Сначала, пока растения еще не появились на поверхности почвы, все определяет испарение. И, как и в предыдущем случае, ЭВР равна нулю (рис. III.2.9, г2). Затем повышается при интенсивном росте биомассы и увеличении транспирационного расхода, однако, достигнув максимума, начинает снижаться, так как биомасса не увеличивается, а потери на эвапотранспирацию продолжают расти, - это неблагоприятная ситуация. О чем говорит и снижение ЭВР на рис. III.2.9, г2.

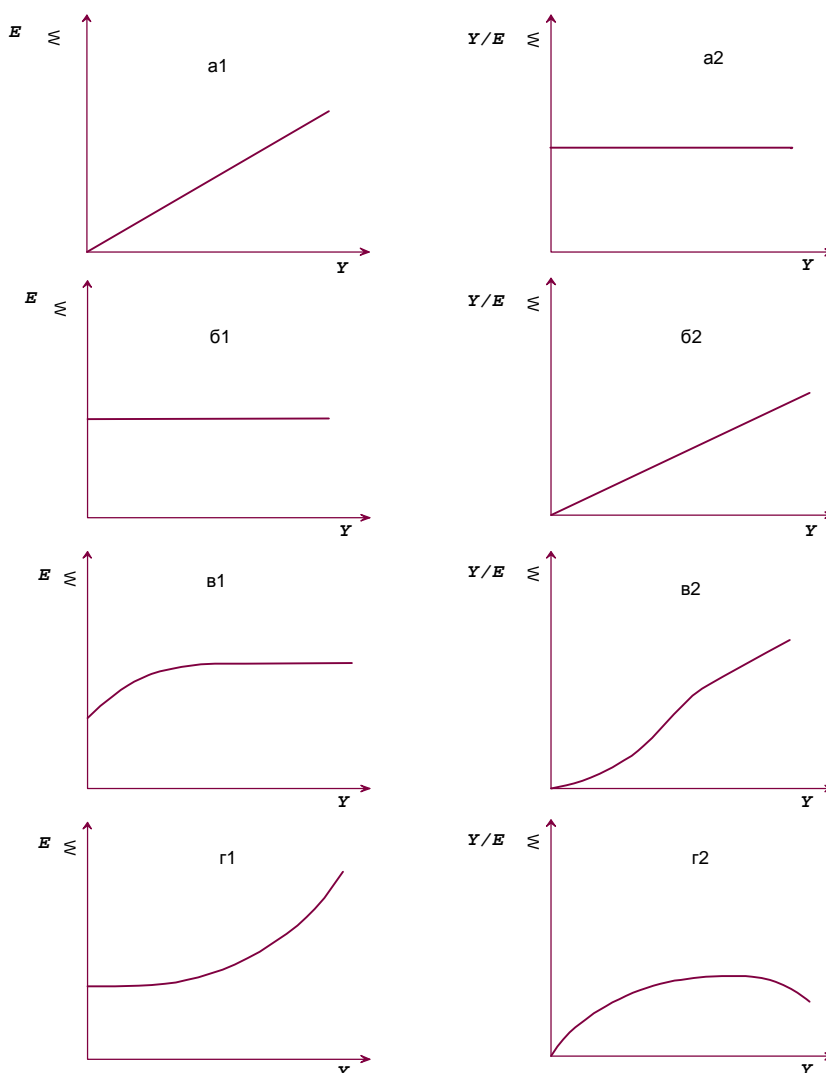


Рис. III.2.9. Зависимости эвапотранспирации ( $E_S$ ) (a1, б1, в1 и г1) и эффективности водопотребления растений ( $Y/E_S$ ) (a2, б2, в2 и г2) от урожая (Y) (по F.G.Viets, 1981) .

Эти все виды кривых справедливы и для динамики развития растений, всех стадий его развития. Они вполне могут быть использованы для улучшения эффективности

использования водных ресурсов в течение вегетационного периода. В течение вегетационного периода есть определенные промежутки времени, когда ЭВР может снижаться (рис. III.2.10)

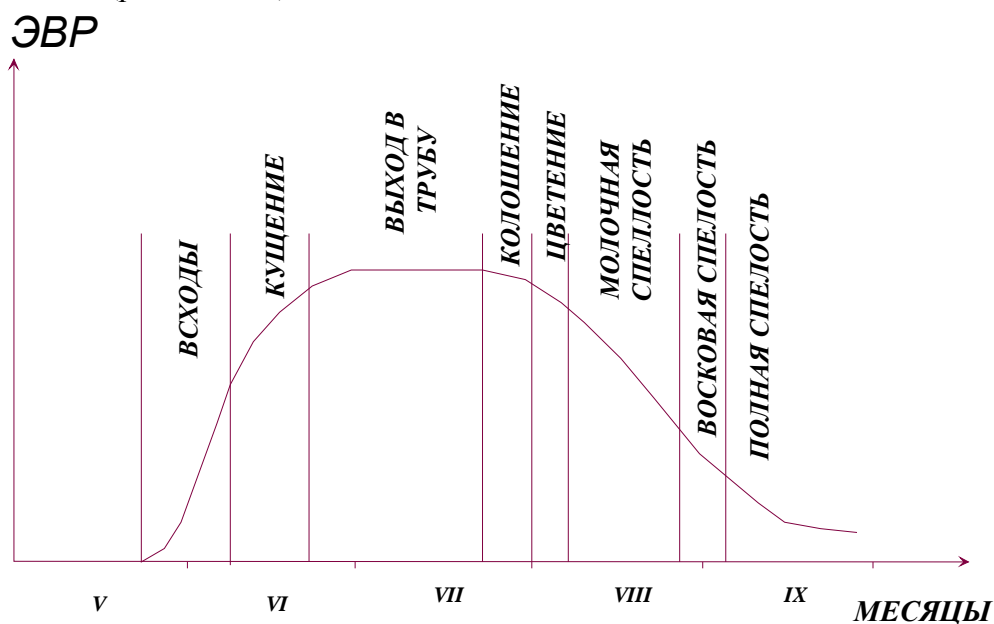


Рис. III.2.10. Характерный вид динамики ЭВР в течение вегетационного развития (для условий засушливых лет центральной части России)

Как видно из рис. III.2.10., в начале, до появления всходов, биомасса равна нулю, и ЭВР также равен нулю. В дальнейшем, по мере роста растений он сначала повышается, а затем, как правило, становится ниже. В эту стадию, стадию начала кущения и необходимы мероприятия по снижению непродуктивных потерь. Также, непродуктивные потери могут возникать в период после уборки урожая, когда биомасса на поле приближается к нулю, а непродуктивное испарение влаги из почвы может быть весьма заметным. И в этот период надо применять определенные меры по их снижению. Таким образом, изучение динамики ЭВР, прогноз этой величины в зависимости от особенностей метеоусловий и других факторов, позволяет оптимизировать в течение вегетационного сезона влагообеспеченность растений и минимизировать непродуктивные расходы.

#### Определение

Для характеристики эффективности использования растениями воды и управлением водными ресурсами используют показатель эффективности водопотребления растений, ЭВР, как отношение сухой биомассы растений ( $Y$ ) к суммарной эвапотранспирации ( $E_s$ ):

$$\text{ЭВР} = \frac{\text{биомасса(сухая)}}{\text{эвапотранспирация}} = \frac{Y}{E_s}$$

Повышение эффективности использования влаги связано с увеличением числителя, т.е. с увеличением продуктов фотосинтеза растений (лучшее использование световой энергии, использование скороспелых видов, изменение сроков посадки и пр.) и с уменьшением знаменателя, - непроизводительных расходов влаги (испарение с поверхности почвы, влаги с поверхности листьев и пр.)

Соответственно, необходимо знать принципы управления и планирования мероприятий по поддержанию ЭВР на постоянном высоком уровне. А это, как отмечено в

*Определении*, мероприятия по регулированию факторов, связанных с биологией самих растений – увеличение числителя в формуле для расчета ЭВР (прежде всего повышение эффективности работы фотосинтетического аппарата), а также почвенных условий, - снижение непроизводительных расходов или снижение значений знаменателя в расчетной формуле. Рассмотрим некоторые из этих возможных воздействий.

### **Факторы управления водообеспеченностью растений**

1. Дата посадки. Этот фактор весьма важен, особенно в условиях дефицита влаги. Он важен потому, что с одной стороны, даже незасухоустойчивые виды успевают развить достаточную биомассу, чтобы завершить свой цикл формирования урожая, избежав водных стрессов. С другой, - необходимо, чтобы почвенная засуха не совпала с периодом наибольшей чувствительности растений к засухе. Как правило, это период интенсивного роста растений, увеличения биомассы. В этом случае приходится решать проблему оптимизации тепловых и водных ресурсов, так как тепловые ресурсы для роста растений, как правило, недостаточны, а водные быстро расходуются. Оптимальные решения могут быть найдены на основе критических температур почвы для прорастания растений и запасов влаги. Или, более определенно, на основании прогнозных расчетов и использования соответствующих технологий. Но в любом случае, выполнение решения по посадке должны быть очень быстрым и точным.

2. Способ посадки. Этому вопросу посвящено очень много работ. Цель – найти оптимальное размещение растений в рядах и расстояние между рядами, чтобы растения в наибольшей мере использовали солнечную радиацию. То есть увеличить эффективность фотосинтеза, тем самым увеличить и ЭВР за счет роста числителя. Здесь надо иметь в виду, что отзывчивость растений на их расположение тем сильнее, чем выше растения. В любом случае необходимо стараться создать, как говорят, архитектуру листового покрова, чтобы с наибольшей эффективностью использовать солнечную радиацию, а соответственно и увеличить ЭВР. (Более подробно об этом факторе – в разделе «Свет»).

3. Конечно, борьба с сорняками, оптимальное внесение пестицидов и пр., которые также увеличивают знаменатель в формуле ЭВР.

### **Почвенные факторы**

1. Обработка почв (вспашка, боронование и пр.). Безусловно, это один из важнейших приемов увеличения ЭВР. За счет обработки почв снижаются непродуктивные потери в виде испарения с поверхности почвы, так как на поверхности почвы создается слой из мелкокомковатых отдельностей, агрегатов, который имеет низкую влагопроводность, является преградой для подтока влаги к поверхности. При вспашке разрушается непрерывность капиллярных путей, почва рыхлится, а, как известно, рыхлая почва хуже проводит капиллярный поток влаги. Все это приводит к снижению знаменателя в выражении для ЭВР, и к соответствующему росту ЭВР. Здесь очень большое поле для исследований: как влияют различные типы, сроки, методы обработки; насколько вспашка способствует укоренению, влияющему на более продуктивное использование почвенной влаги из глубоких слоев; и т.д.

2. Удобрения. Это воздействие (как, впрочем, и вышеперечисленных факторов) разнообразное. Перечислим возможные пути влияния удобрений на ЭВР: (1) увеличение роста корней. Это касается, прежде всего, фосфатных удобрений; (2) увеличение вегетативной массы, а, следовательно, затенение поверхности почвы и лучшее использование солнечной энергии; (3) ускорение циклов развития, что особенно важно для засушливых регионов и, конечно (4) увеличение биомассы, что приводит к росту ЭВР. Следует иметь в виду, однако, что воздействие удобрений на ЭВР различно в различных по водообеспеченности условиях. На рис. III.2.11 приведены зависимости ЭВР от урожая, значения которого повышалось в одних и тех условиях за счет внесения азотных удобрений.

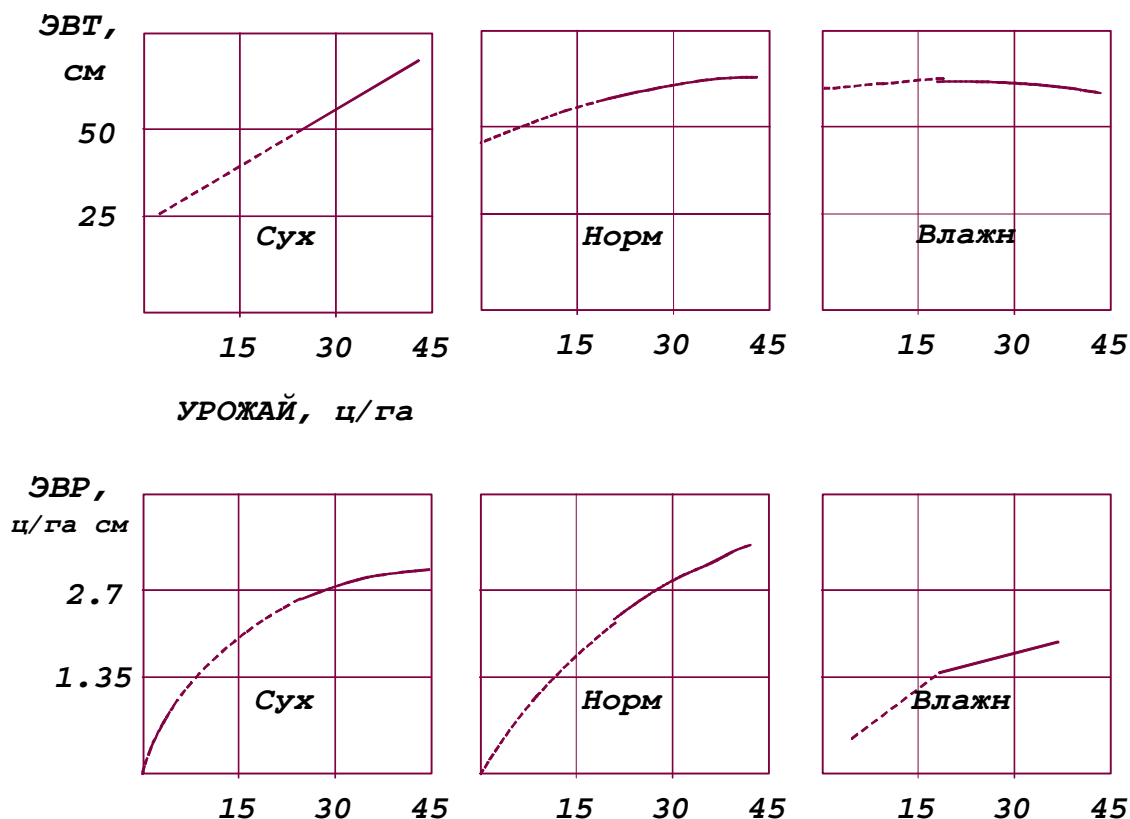


Рис. III.2.11 Зависимость эвапотранспирации (ЭВТ, см водн.слоя) и эффективности водопотребления растений (ЭВР, ц/га см) от урожая растений (У, ц/га), увеличение которого достигнуто внесением азотных удобрений. Пунктиром обозначены гипотетические части этих кривых. (По Viets, 1981).

Из приведенных кривых видно, что в сухих условиях при определенных уровнях развития биомассы внесение удобрений может быть особо эффективным. А вот во влажных, хотя и происходит некоторый рост ЭВР за счет удобрений, но это увеличение небольшое, и, вероятно, увеличение внесения удобрений не будет являться существенной мерой по эффективности использования воды. Тем более что в переувлажненных условиях, действие удобрений не может быть эффективным до тех пор, пока не оптимизирован (за счет дренажа, прежде всего) водный режим почвы.

3.Мульчирование поверхности. Это чрезвычайно важный аспект снижения непродуктивных потерь в виде испарения (см. Главу II.2)

Однако, не следует забывать и о других положительных воздействиях мульчи: увеличение водопроницаемости, а, следовательно, увеличении почвенных влагозапасов, снижении поверхностного стока, что в ряде случаев может стать доминирующим фактором использования этого приема. Например, в тропических странах при осадках ливневого типа.

#### Литература

1. М е д в е д е в В. В., С. Ю .Б у л ы г и н , Т.Н.Лактионова, Р.Г.Деревянко. Критерии оценки пригодности земель Украины для возделывания зерновых культур. «Почвоведение», №2. 2002, с.216-227
2. С у д н и ц ы н И. И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1979. 253 с.
3. С л е й ч е р Р. Водный режим растений. М.: Мир, 1970.

4. Физика среды обитания растений. Л., 1968. 304 с.
5. Plant Environment and efficient water use. 1981.Ed. By W.H.Pierre, Don Kirkham, J.Pesek, R.Shaw. ASA&SSSA of America. 295 p.
6. V i e t s F. G. Increasing Water Use Efficiency by Soil Management. In “Plant environment and efficient water use. Ed.by W.H.Pierre, Don Kirkham, John Pesek, Robert Shaw. Publ. by ASA&SSSA. 1981.

### Глава 3. Физика минерального питания

#### Основные элементы минерального питания растений

Для большинства растений необходимы в том или ином количестве 16 элементов, которые приведены в табл. III.3.1. Они формируют группы макро, вторичных и микроэлементов. Каждый из элементов выполняет свою специфическую роль, но следует учесть, что на 95% растения состоят из С, Н и О, которые поступают в растения из  $\text{CO}_2$  воздуха и почвенной воды. Остальные 13 или 14 элементов растения берут в ионной форме из почвенного раствора, хотя S и Cl растения иногда способны сорбировать и усваивать из воздуха в виде  $\text{SO}_2$  и  $\text{Cl}_2$ . Так же не следует забывать об уникальной способности бобовых фиксировать атмосферный азот благодаря симбиотическим взаимоотношениям *Rhizobia* в корневой зоне. Натрий, кремний, кобальт и ванадий могут способствовать увеличению урожая, но не являются определяющими элементами в его формировании. Иногда Na выполняет функции K, например, для растений сахарной свеклы. А кобальт способен играть существенную роль в формировании витамина  $\text{B}_{12}$ , который принимает участие в фиксировании азота *Rhizobia*.

Табл. III.3.1

Основные химические элементы жизнеобеспечения растений и формы их потребления

Макроэлементы	Макроэлементы вторичной потребности	Микроэлементы
Углерод ( $\text{CO}_2$ )	Кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ )	Бор ( $\text{H}_2\text{BO}_3^-$ )
Кислород ( $\text{O}_2$ )	Магний ( $\text{Mg}^{2+}$ )	Хлор ( $\text{Cl}^-$ )
Водород ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Сера ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	Кобальт ( $\text{Co}^{2+}$ )
Азот ( $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ и $\text{N}_2$ для бобовых)		Медь ( $\text{Cu}^{2+}$ )
Фосфор ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{HPO}_4^{2-}$ )		Железо ( $\text{Fe}^{2+}$ )
Калий ( $\text{K}^+$ )		Марганец ( $\text{Mn}^{2+}$ )
		Молибден ( $\text{MoO}_4^{2-}$ )
		Цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ )

В этой главе мы остановимся на физических закономерностях и физически обоснованных моделях потребления и транспорта веществ в растении. Вопросы оптимального обеспечения, взаимовлияния различных элементов, применения их в качестве удобрений более подробно рассматриваются в учебниках по агрохимии.

#### Основные механизмы переноса веществ.

Описание явлений движения веществ в почве нам уже знакомо (см. Главу I.3). Все отмеченные в Главе I.3 явления свойственны и подтоку веществ к корню. Но в отличие от почвенных процессов, где доминантное значение может иметь гидродинамическая диффузия, обусловленная неоднородностью потока в неравномерном поровом пространстве почвы, в растении факторы гидродинамической дисперсии, незначительны. Основных физических процесса подтока и переноса веществ в растении два - конвекция и диффузия. Конвекция, напомним, движение вещества с массовым потоком раствора. Массовый поток жидкости в вегетирующее растение всегда существует за счет транспирации. Поэтому вполне возможен перенос ионов к корню и по растению за счет этого процесса. Кроме того, растение способно избирательно потреблять некоторые ионы, которые особенно важны в его жизнедеятельности. Этот перенос будет осуществляться уже из-за концентрационных перепадов, так как около корня и в корне концентрация нужного растения элемента ниже, чем в почвенном растворе. И тем ниже, чем выше

потребность в нем. Соответственно, выше градиент концентрации между поверхностью корня и в почвенном растворе, выше диффузионный поток. Причем большинство положительно заряженных биофильных элементов растение способно потреблять из сорбированного состояния, за счет обменных реакций «ППК - почвенный раствор» и «почвенный раствор – поверхность корня». Все это схематично указано на рис. III.3.1. где приведены все перечисленные процессы. Диффузионно и благодаря подтоку раствора (конвективно) к корню доставляются элементы. Их наличие в почвенном растворе регулируется обменными реакциями с соответствующими ионами ППК, которые также регулируются активностями (концентрация) потребляемых ионов в растворе.

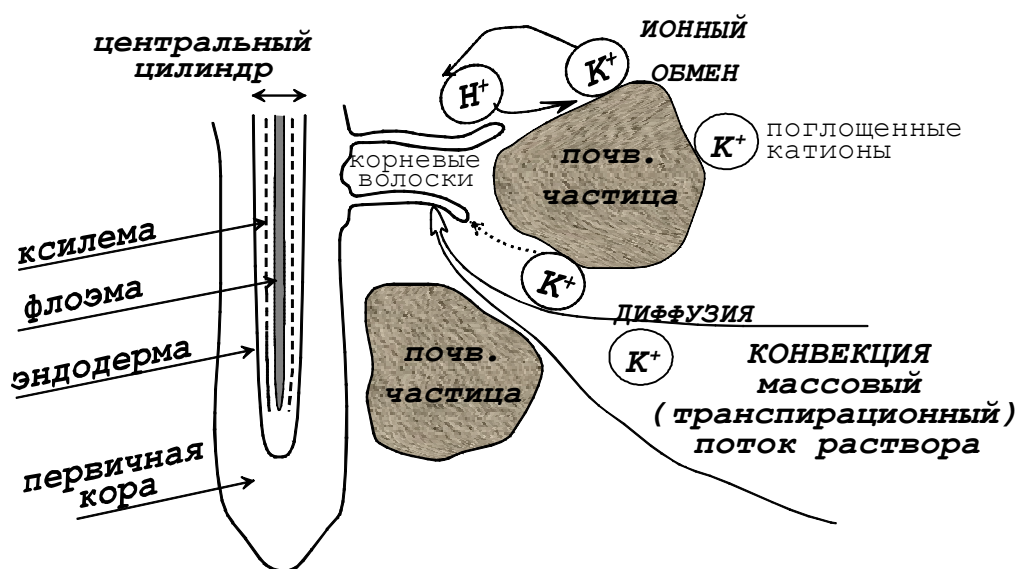


Рис. III.3.1. Схема процессов подтока веществ к корню растения

О значении *конвекции* в передвижении веществ и их поглощение корнем растений указывает опыт, проведенный С.Барбером с коллегами (1963). Так как в растение поступает большое количество почвенного раствора для поддержания транспирационного тока, можно было бы предположить, что именно с этим потоком и будет поступать основное количество питательных веществ. Так вот С.Барбер с коллегами попытался свести баланс веществ: зная содержание элемента в растении, его транспирационный коэффициент (количество воды необходимое для построения единицы сухой биомассы) можно рассчитать какова должна быть концентрация элемента в почвенном растворе, для того, чтобы свести баланс. Далее, можно сравнить полученную по такому балансовому расчету концентрацию элемента с его реальной в почвенном растворе. Если концентрация элемента в почвенном растворе окажется выше расчетной, то обеспечение растения этим элементов вполне возможно лишь за счет конвективного потока. Если же меньше, - значит, этот элемент поглощается за счет других механизмов, прежде всего диффузии. Результаты проведенного опыта Барбера с соавторами приведены в табл. III.3.2



Возможность поглощения растениями элементов с общим транспирационным потоком в виде конвекции.

Элемент	Содержание в растении, мг/г	Необходимая расчетная концентрация в почвенном растворе, мг/л	Реальная концентрация в почвенном растворе, мг/л	Возможность обеспечения элементом путем конвекции
Ca	2.2	4.4	33.0	Возможно
Mg	1.8	3.6	28.0	Возможно
K	20.0	40.0	4.0	Невозможно
P	2.0	4.0	0.5	Невозможно

Таким образом, совершенно очевидно, что иона К и Р потребляются из раствора со значительно большей скоростью, чем это возможно конвекционным путем. Их перенос осуществляется в виде диффузионного. При этом, следует учитывать, что процесс диффузии ионов в почве довольно длительный. Действительно, коэффициент диффузии большинства ионов в растворе составляет не более  $1.73 \text{ см}^2/\text{сут}$ . Для иона К коэффициент диффузии в растворе составляет 1.71, ионов  $\text{NO}_3^-$  – 1.64, Са и Mg – 0.67 и  $0.6 \text{ см}^2/\text{сут}$ . В почве же, с учетом извилистости порового пространства и реальной влажности необходимо использовать уже не коэффициент диффузии, а эффективный коэффициент диффузии солей, который обычно на 2-3 порядка ниже. По подсчетам Барбера (1988) ион калия за сутки за счет диффузии способен передвинуться не более чем на 0.13 см, а  $\text{H}_3\text{PO}_4^-$  – и того меньше, всего только на 0.004 см. Поэтому, не только ион движется к корню за счет диффузии, но и корню необходимо «двигаться», расти для получения необходимого количества веществ. По-видимому, этот фактор, - фактор активного роста корней, освоения корнями нового почвенного пространства, может оказаться определяющим в обеспечении растений питательными элементами, а не только чисто физические процессы конвективного и диффузионного подтока веществ к корням растений. Определить значение этого фактора в прямых экспериментах довольно затруднительно: трудно «разделить» факторы подтока иона к корню за счет диффузии и роста корня в направлении большей концентрации иона. Такого рода исследование можно провести лишь с помощью математической модели, когда возможно выделение отдельных параметров, характеризующих тот или иной процесс, а затем оценить относительное влияние на результирующее поглощение веществ поочередно каждого из параметров, оставляя остальные постоянными. Рассмотрим такого рода модельный анализ с помощью математической модели поглощения веществ корнем растения.

### Математическая модель поглощения минеральных веществ

Основу поглощения веществ растениями составляют два процесса: диффузия, которая вводится в виде гидродинамической диффузии, и конвекция. Эти два процесса описываются следующими уравнениями (см. Главу I.3):

$$\left( \frac{\partial c}{\partial t} \right)_{diff} = -D_h \frac{\partial^2 c}{\partial r^2}$$

$$\left( \frac{\partial c}{\partial t} \right)_{conv} = v \frac{\partial c}{\partial r}$$

где  $c$  - концентрация иона в поровом растворе,  $D_h$  - коэффициент гидродинамической диффузии,  $r$  - радиус зоны, из которой происходит потребление вещества,  $v$  - макроскопическая скорость потока раствора (т.е. усредненная скорость движения в капиллярах почвы).

Кроме того, происходит обмен ионов в растворенном и поглощенном состояниях по механизму моментальной линейной адсорбции, т.е. по уравнению  $c_s = K_d \cdot c$ , где  $c_s$  – концентрация иона в поглощенном состоянии,  $K_d$  – константа распределения.

Этот процесс формирует фактор дополнительного источника-стока, -  $J_s$ . В целом подток веществ к корню можно выразить в виде уже знакомого нам конвективно-диффузионного уравнения, но записанного в цилиндрических координатах, так как поток к корню происходит по радиусу к центрально расположенному корню:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_h \frac{\partial c}{\partial r} + v c r_0 \right) \pm J_s$$

где  $r_0$  - радиус корня.

Вводят еще и фактор роста, в виде коэффициента роста корней -  $K_r$ . А также условие на границе корня, в виде поглощения вещества ( $J_r$ ) по закону Михаэлиса-Ментена

$$J_r = \frac{J_{\max} \cdot K_m c}{1 + K_m c} - c_{\min}$$

где  $J_{\max}$  - максимально возможный для данного растения поток вещества в корне,  $K_m$  – константа Михаэлиса, равная концентрации иона в растворе, при которой поглощение становится половинным ( $0.5 J_r$ ). Физически эта константа показывает насколько растение активно способно потреблять вещество из раствора; чем она выше, тем менее активно растение потребляет вещество,  $c_{\min}$  - минимальная концентрация веществ в растворе, при которой возможно его поглощение.

При построении модели исходят из предположения, что почва гомогенна, величины гидродинамической диффузии и линейной сорбции не зависят от концентрации, корень цилиндрический, полностью отсутствует микробиологическая активность. Все это позволяет составить численную модель и провести ее анализ на чувствительность к отдельным параметрам. Анализ чувствительности – это исследование изменения поглощения иона корнем при попеременном изменении каждого из параметров модели. Эти параметры, как растения, так и почвы, в итоговом виде представлены в табл. III.3.3

Табл. III.3.3

Параметры модели потребление ионов корнями растений (по Крамеру)

Параметры растения	Параметры почвы
$r_0$ – диаметр корня	$c$ – концентрация вещества в поровом растворе
$c_{\min}$ – минимальная концентрация раствора, при которой возможно поглощение	$D_h$ - гидродинамическая диффузия
$J_{\max}$ – максимально возможное потребление	$K_d$ – коэффициент распределения
$K_m$ – константа Михаэлиса	$v$ – поток влаги к корню
$K_r$ – параметр скорости роста корней	

Анализ модели по поглощению иона К в отношении указанных параметров приводит к следующему (рис. III.3.4):

В наибольшей степени поглощение иона К определяется скоростью роста и радиусом корней (параметры  $K_r$  и  $r_0$ ). Поглощение  $K^+$  наиболее сильно увеличивается при изменении именно этих параметров растения. Почвенные параметры в значительно меньшей степени влияют на поглощение иона К. А вот при увеличении константы

Михаэлиса поглощение уменьшается, что и следовало ожидать: ведь этот параметр отражает концентрацию, при которой скорость потребления равна половинной. Чем больше эта концентрация, тем в меньшей степени выражена способность растения поглощать вещество.

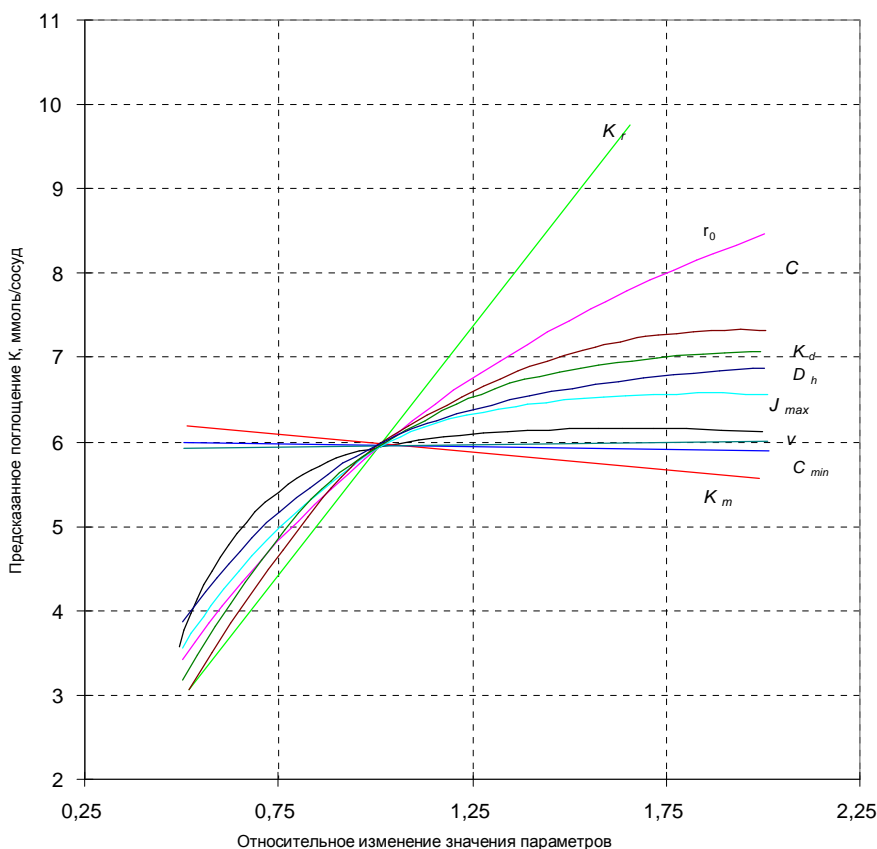


Рис. III.3.4 Поглощение иона  $K$  в зависимости от относительного изменения параметров физически обоснованной модели Крамера.

#### Определения

**Подток минеральных веществ к корню** осуществляется в виде конвективного и диффузионного потоков. Биофильные элементы, такие как  $Ca$  и  $Mg$ , могут передвигаться к корню в основном в виде конвективного потока совместно с общим транспирационным потоком в растении. Другие биофильные элементы (калий, фосфор) передвигаются к корню путем диффузии.

**Скорость поглощения веществ** определяется в наибольшей степени такими параметрами, как скорость роста корней и их средний диаметр. Значительно в меньшей степени скорость поглощения увеличивается при росте концентрации вещества в поровом растворе ( $c$ ), гидродинамический диффузии ( $D_h$ ), коэффициенте распределения ( $K_d$ ) и микроскопической скорости потока влаги ( $v$ ) к корню.

#### Транспорт веществ по растению

Ионы, поступившие в клетки корня, перемещаются по первичной коре к эндодерме. Это перемещение возможно как по апопласту, так и по симпласту. Апопластическое перемещение — это движение ионов по клеточным стенкам. Физически этот тип переноса происходит за счет диффузии по градиенту концентрации и гидродинамического переноса с движущейся к центральному цилиндру водой. По симпласту ионы движутся внутри клеток за счет, прежде всего осмотического движения цитоплазмы. Между клетками при

симпластическом переносе ионы проникают по так называемым плазмодесмам (см. рис. III.3.5). Здесь также основной тип переноса – диффузионный, по градиенту концентрации. Это градиент возникает за счет повышенной метаболической активности тканей в центре корня. Эта активность приводит к снижению концентрации веществ в центре корня: градиент концентрации движет вещества от поверхности корня к его центральной части. Однако, наиболее труднопроницаемая часть в корне – это слой клеток эндодермы (см. рис III.3.5). В этих клетках встречаются специфические гидрофобные образования – пояски Каспари. Эти гидрофобные барьеры не позволяют веществам и воде свободно проникать через клетки эндодермы. Имеются лишь некоторая часть клеток, не имеющих поясков Каспари. Это пропускные клетки, через которые симпластическим потоком и движутся растворы. В дальнейшем, опять-таки совместно по апопласту и симпласту вещества передвигаются по флоэме, наконец, попадают в мертвые сосуды ксилемы, в которых уже движутся как в тонких капиллярах. Здесь основным механизмом переноса является градиент давления влаги (осмотического), который формирует транспирационный поток воды и движет вместе с ним ионы в различные части растения.

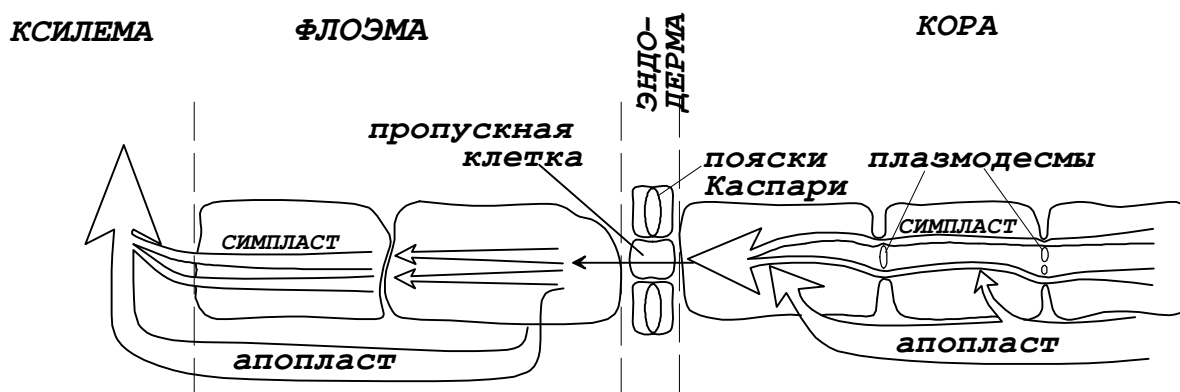


Рис. III.3.5 Движение веществ по корню: симпластический и апопластический переносы.

#### Определения

**Передвижение веществ внутри корня** происходит в основном по диффузионному механизму, за счет градиента концентрации, который возникает и поддерживается метаболической активностью тканей внутри корня.

**Основное сопротивление переносу веществ** и воды возникает на уровне эндодермы, где гидрофобные пояски Каспари обладают пониженной проводимостью; проводящими элементами здесь являются пропускные клетки без гидрофобных включений. В эндодерме перенос происходит только по симпласту.

Радиальное движение по флоэме, осуществляемое по симпласту и апопласту сменяется **вертикальным переносом веществ по капиллярам ксилемы**. На этом этапе движение в большей мере регулируется интенсивностью транспирационного тока, т.е. по конвективному типу.

Может сложиться впечатление, что перенос растворов осуществляется в основном по ксилеме. Однако, это не совсем так. Активный перенос, в основном, нисходящий, осуществляется и по флоэме. Соотношение этих потоков следует учитывать при балансе веществ в растении, при расчетах потоков основных элементов в семя.

Как указывалось в начале этой главы, основными элементами, циркулирующими в растении, являются углерод, азот и вода. Точнее, - вода, углерод и азот, так как они

участвуют в жизнеобеспечении растений примерно в весовом соотношении 600:12:1. На важнейшие компоненты транспорта этих веществ в растениях, переноса их в семя и в оболочку плода указывает приведенная на рис. III.3.6 схема баланса и потоков углерода, азота и воды.

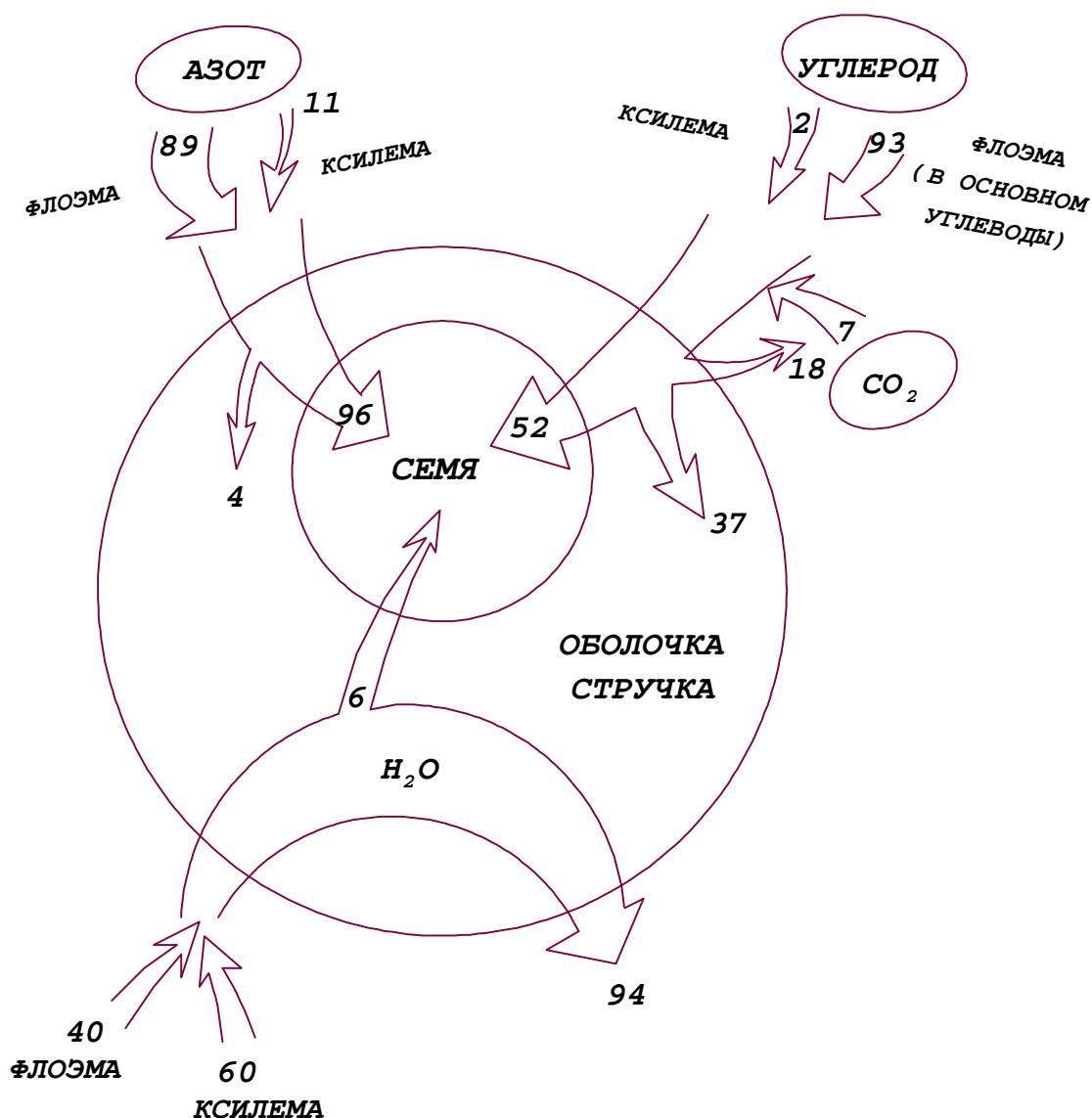


Рис. III.3.6. Схема баланса и потоков углерода, азота и воды (указаны цифры в процентах) в семя и оболочку плода люпина (по J.S.Pate et al, 1977).

Из этой схемы видно, что в основном транспорт веществ по растению к его плодам осуществляется по флёмю. Можно сказать, что транспорт аминокислот, азота и других веществ к потребляющим зонам, зонам активного дыхания, происходит преимущественно по флёмю. Этот перенос подчиняется общим закономерностям переноса веществ, который происходит за счет конвективного и диффузного транспорта. Важной в этом случае является зависимость транспорта веществ от температуры: в целом для большинства культурных растений возможность переноса веществ осуществляется в пределах температур от 5 до 45<sup>0</sup>С. А оптимальная температура флёмного транспорта лежит в диапазоне 22-25<sup>0</sup>С, хотя этот диапазон может значительно изменяться для теплолюбивых и холодоустойчивых видов. Указанный температурный оптимум

флоэмного транспорта - это температурный оптимум действия большинства ферментов. То, что процесс флоэмного транспорта регулируется в основном ферментативной активностью, доказывает и тот факт, что коэффициент  $Q_{10}$  транспортных процессов достигает при оптимуме 2.5-3.0. А это близко к величине  $Q_{10}$  ферментативных реакций.

Зависимость интенсивности флоэмного транспорта от температуры носит вид типичных биологических кривых, оптимум которых смещается в область более низких температур для холодоустойчивых, и в область высоких – для теплолюбивых растений (рис. III.3.7)

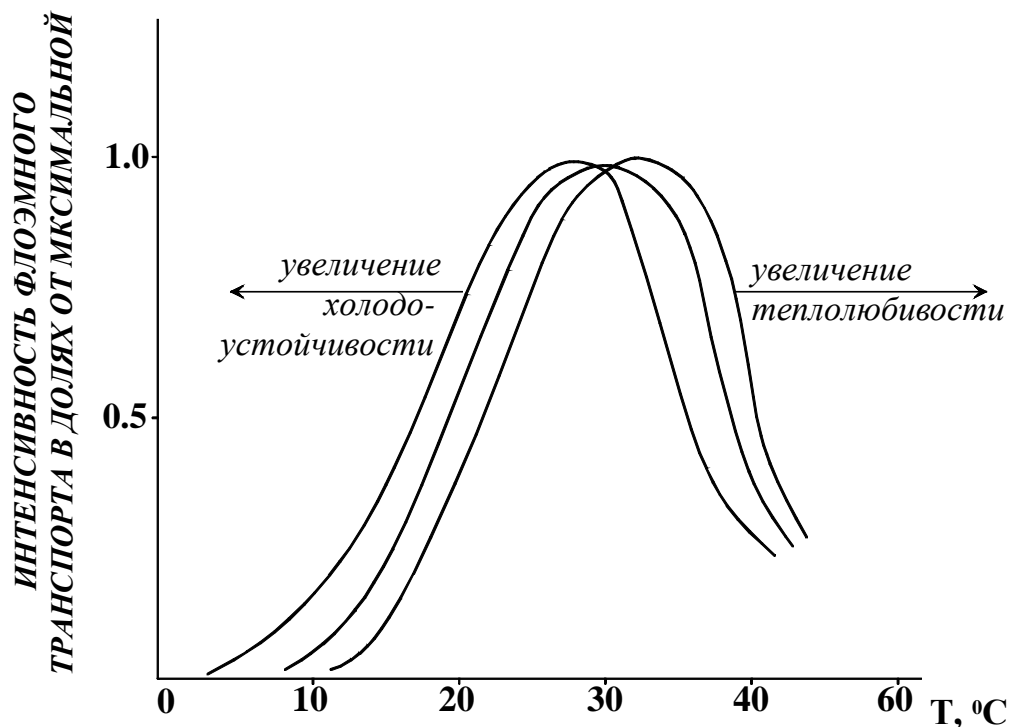


Рис. III.3.7. Зависимость интенсивности флоэмного транспорта для растений при увеличении их теплолюбивости.

### Литература

- Б а р б е р С. А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. Пер. с англ. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
- Н а й П. Х., Т и н к л е р П. Б. Движение растворов в системе почва–растение. М.: Колос. 1980. 365 с.
- Handbook of Soil Science. Ed. By Malcolm E. Sunmer. 2000. CRC Press.
- Pate J.S., P.J. Sharkey, C.A. Atkins. 1977. Nutrition of developing legume fruit. Functional economy in terms of carbon, nitrogen, water. "Plant Physiology", v.59. P.506-510.

## Глава III.4. Растения и свет

### Значение светового потока для растений

На вопрос о значении света для растений ответ вполне ясен: свет является основной энергией для работы фотосинтетического аппарата. Поэтому чем лучше освещение, чем лучше усвоение света растением, тем выше фотосинтез и, соответственно, биомасса. Это общая схема, она нам знакома из учения о фотосинтезе растений (см. раздел “Фотосинтез и дыхание”). Однако, в учении о фотосинтезе речь шла о функционировании пигментов, прежде всего хлорофилла, в зависимости от физических факторов среды, от света, в частности. При этом, не все и не всегда для растения в целом будет идти же по тем зависимостям, которые получены для пигментов. И уж конечно, имеются отдельные специальные закономерности по использованию растительным покровом световой энергии. Поэтому к общему ответу о значении света для растений, неизбежно появляются дополнительные вопросы, которые для реального растительного покрова становятся главенствующими. Например, какие части спектра растений наиболее важны для растительного сообщества? Как изменяется продуктивность растений при изменении формы листовой пластинки, ее угла поворота к солнечным лучам, ее суточного движения? Или за счет структуры (точнее архитектуры, ярусности листьев) растительного покрова? И как физика этого явления может способствовать наибольшему усвоению растениями солнечной лучистой энергии или искусственного освещения. На этих вопросах и остановимся.

В главе III.1 при изучении процесса фотосинтеза, вполне определенно было доказано, что у большинства наземных растений имеется два максимума в длинах волн, которые наиболее эффективны. Это максимумы в синей (голубой) и красной частях спектра, длины волн около 400 и 700 нм (см. Главу III.1). А вот для волн в диапазоне от 730 до 1200 нм поглощение света достигает лишь нескольких процентов от потока световой энергии. Однако, это было показано для растительных пигментов, главный из которых - хлорофилл. В процессе влияния световой энергии на рост и развитие растений следует учитывать и процессы отражения, рассеивания, прохождения, т.е. транспорта лучистой энергии в листе растения. В целом ход фотосинтетической кривой в виде зависимости урожая от длин волн с учетом этих процессов остается прежним (см. рис. III.4.1.), с максимумами в области 400 и 600-700 нм, однако, не со столь яркими, как для фотосинтетической активности пигментов. Заметно более интенсивное поглощение и в желто-зеленой области спектра, в области длин волн от 500 до 600 нм. Это связано, как подчеркивалось выше, с особенностями поглощения света листовой поверхностью, особенностями физических процессов в фотосинтетическом аппарате листа, а не только его пигментной части.

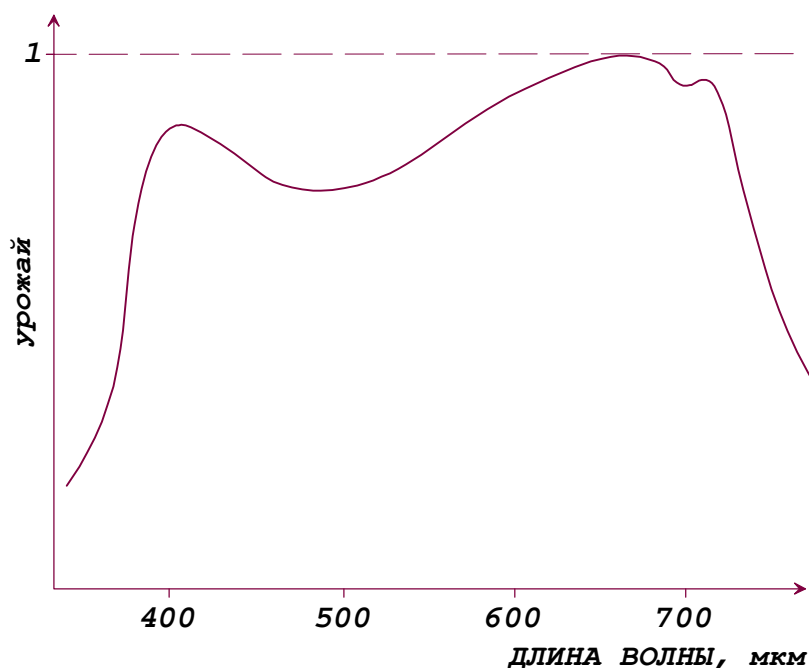


Рис. III.4.1. Относительный урожай растений при различных длинах волн (по МакГри, 1986).

Это указывает на то, что следует учитывать не только влияние спектрального состава света на работу пигментов, но и процессы «доставки» световой энергии к этим ферментам. Это особенно важно, если этой энергии оказывается недостаточно, при затенении растений или при формировании определенного направления листьев у различных растений. Поэтому остановимся на значении положения листьев для формирования продуктивности сообщества.

### Рост и усвоение солнечной радиации

Большинство исследований используют закон ослабления радиации в растительном покрове, аналогичный закону Ламберта-Буге-Бэра:

$I(L) = I(0) \exp(-KL)$ , где  $I(L)$  – радиация на горизонтальной поверхности под листовой поверхностью, имеющей индекс листовой поверхности  $L$ ,  $K$  – коэффициент экстинкции (поглощения или ослабления) листовой поверхностью лучистой энергии, а  $I(0)$  – поступающая световая энергия.

Физически, применение этого уравнения приравнивает растительное сообщество к некоторой непрозрачной среде с коэффициентом поглощения  $K$ . Это уравнение показывает, что поглощение световой энергией определенным листовым ярусом в одинаковой степени зависит от  $K$ , и от  $L$ . Чем эти величины больше, тем лучше этот световой ярус поглощает световую энергию. Для величины листового индекса это вполне понятно: чем больше площадь листьев по отношению к занимаемой поверхности, тем больше и поглощается энергии. А вот величина коэффициента поглощения – величина более сложная, которая зависит от геометрии, расположения в пространстве и свойств листьев. И чем он выше, тем в меньшей степени зависит проходящая через листья энергия от поступающей. То есть, тем больше листья поглощают энергии. Это хорошо видно на рис III.4.2 а, б. Для горизонтально расположенных листьев, для которых коэффициент  $K$  близок к 0.9, практически вся световая энергия усваивается растениями. И напротив, при вертикально расположенных листьях, когда  $K$  приближается к 0.3, зависимость довольно крутая, и увеличение поступающей энергии будет приводить к увеличению поглощения, – растения чувствительны к фактору поступающего света.



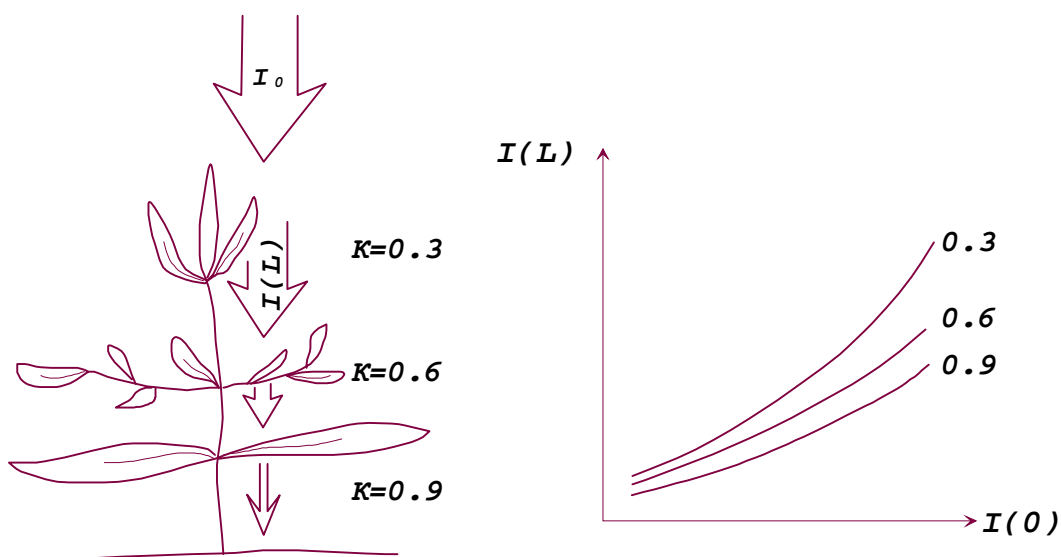


Рис. III.4.2. Зависимость распределения коэффициента поглощения в растительном покрове при различном расположении листьев (а) и изменение светового потока внутри растительного покрова при различных коэффициентах поглощения листьев (б)

Следует ожидать, что и урожай будет зависеть от расположения листьев, или от коэффициента  $K$ . По различным данным прирост в случае горизонтально расположенных листьев с увеличением поступающей энергии будет небольшим (рис. III.4.3). Действительно, в этом случае вся поступающая энергия используется при любом ее уровне, реализованы все возможности использования при ее увеличении. В этих условиях уже практически невозможно регулировать продуктивность фактором света через геометрию расположения листьев. А вот в случае вертикального расположения листьев, напротив, прирост оказывается очень отзывчивым от поступающей световой энергии.

**Прирост урожая,**  
**г/м<sup>2</sup>сут**

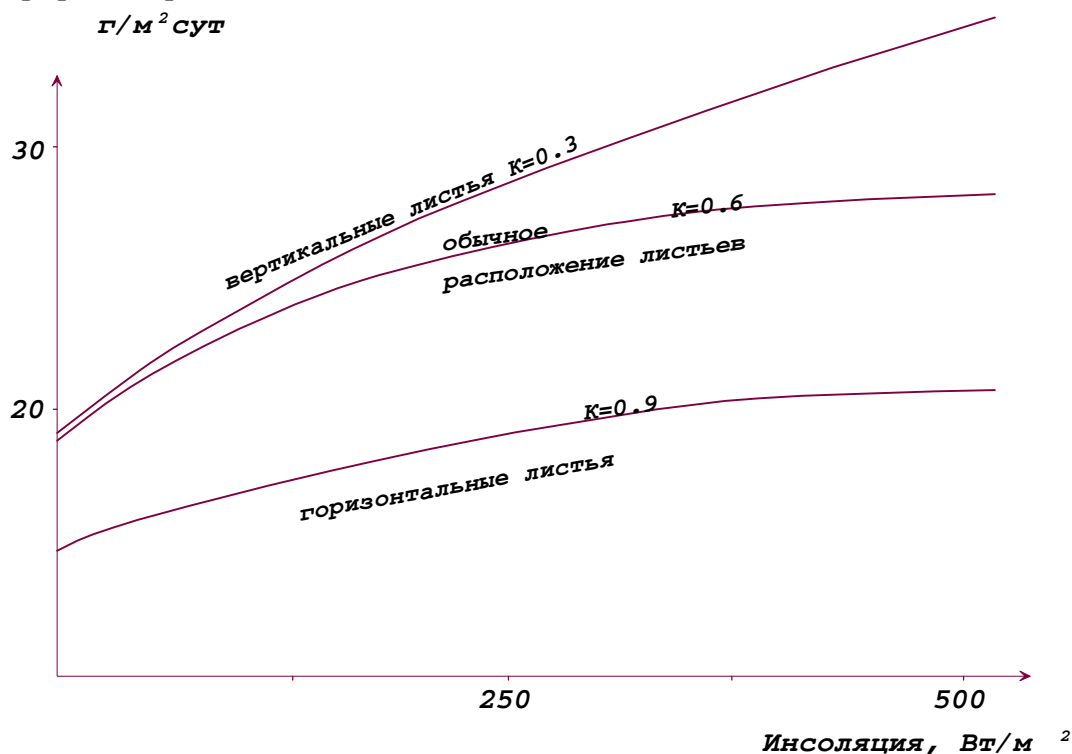


Рис. III.4.3. Зависимость урожая от расположения листьев (коэффициента поглощения,  $K$ )

Этот момент очень важен с практической точки зрения: ведь формирование многоуровневых посевов должно способствовать более полному усвоению солнечной энергии. Поэтому, если верхние листья многоуровневого посева, скажем, кукурузы, будут иметь вертикальное направление, а нижние листья – ближе к горизонтальному, то это архитектура посева будет оптимально использовать световую энергию. Здесь следует иметь в виду, что положение листьев является не только важным фактором в отношении поглощения световой энергии, но и в отношении газообмена. Как правило, растения с горизонтально расположенными листьями обладают более высоким газообменом. Это хорошо иллюстрируется рис. III.4.4, на котором представлено распределение потока ФАР и интенсивности газообмена ( $\text{мг/дм}^2 \text{ ч}$ ) при различном расположении листьев. В случае оптимального расположения листьев в посевах и распределение лучистого потока, и газообмен на всех уровнях примерно одинаков, что характеризует ценоз как оптимальный по продуктивности (об этом говорит и наибольший газообмен всего посева в случае оптимального расположения листьев).

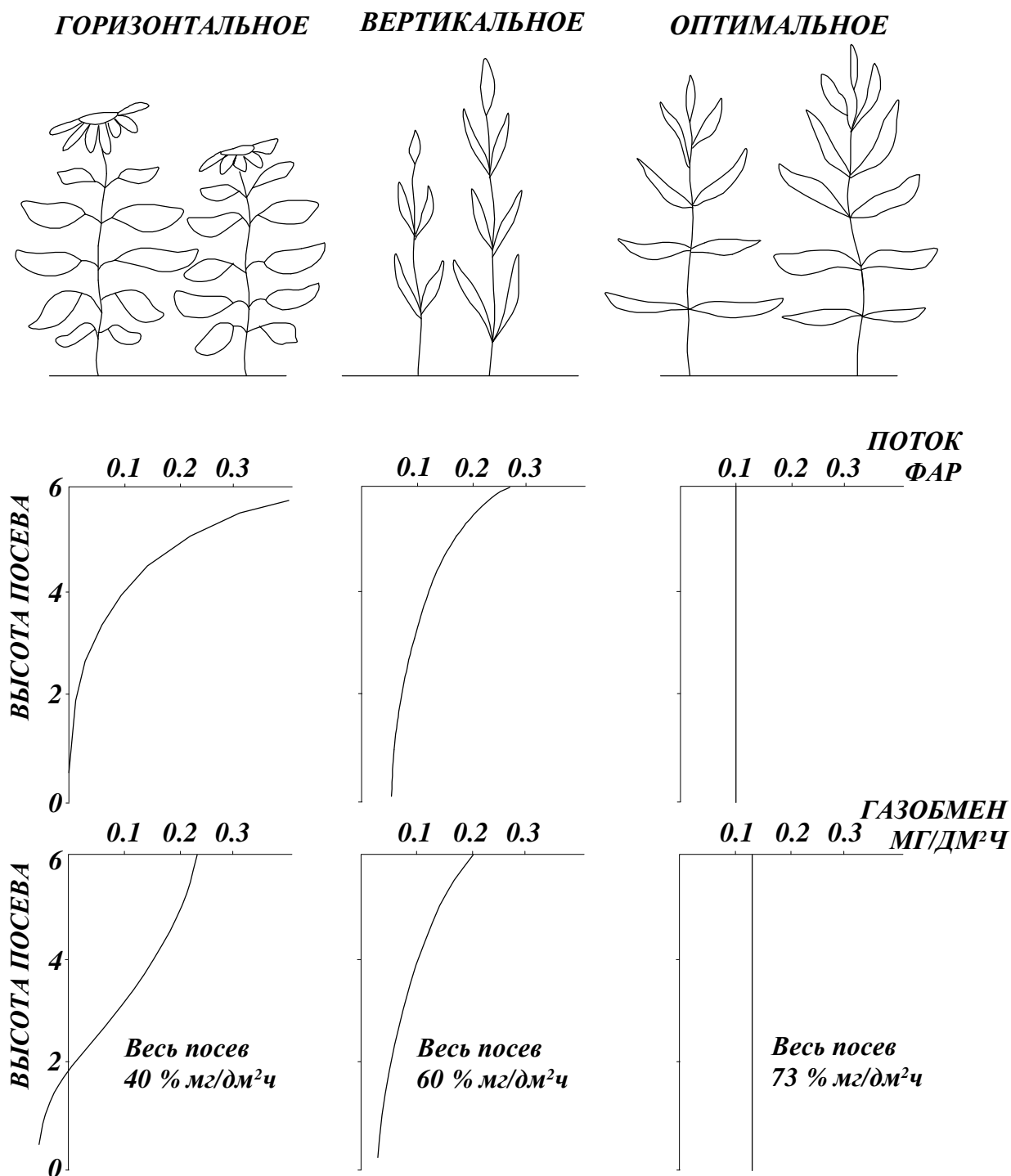


Рис. III.4.4. Распределение потока ФАР и интенсивности газообмена листьев в посевах в зависимости от архитектуры посева (по Х.Т.Тоомингу, 1977)

Поэтому, мы в очередной раз убеждаемся, что рассмотрение отдельно взятого фактора (например, интенсивности и направления светового потока) имеет важное познавательное значение. Но рост, развитие, продукционный процесс – эти процессы зависят от многих факторов, среди которых опять-таки возможно преимущественное воздействие лимитирующего фактора и компенсационное действие сопряженных. Таким примером как раз и является преимущественное горизонтальное расположение листьев. С точки зрения направления солнечных лучей такое расположение оптимально в тропических широтах, при вертикальном падении световых лучей. В северных широтах такое расположение

листьев оказывается невыгодным. Но горизонтальное расположение листьев, особенно для отдельных листьев в верхней части посева, выгодно с точки зрения газообмена. Если же имеется недостаток, каких либо ресурсов, когда развитие большой поверхности листьев ограничено (условиями минерального и водного питания, метеоусловиями), то растения формируют преимущественно горизонтально направленные листья, компенсируя недостаток каких-либо факторов оптимизацией газообмена и поступления фотосинтетически активной радиации.

Следует учитывать и еще один важный момент в отношении положения листьев к световому потоку и их газообмена, т.е. в отношении архитектуры посева: динамику газообмена и изменения угла наклона лучей в течение светового дня. Кроме того, имеются большие возможности для регулирования прироста за счет изменения расположения листьев растений, или, напротив, расположения светового источника по отношению к листьям растений, т.е. в условиях теплиц.

Рассмотрим значение этого фактора – положение листьев относительно светового потока в течение светового дня, – подробнее.

### **Направление светового потока**

У многих растений листья с самого начала и в течение всей их жизни растут почти вертикально вверх. Например, у лука. А это означает, что прямую полуденную радиацию эти растения почти и не усваивают. Для них наиболее эффективен боковой свет. Аналогично и у листьев злаковых растений. Во взрослом вегетирующем состоянии листья этих растений также имеют некоторый угол наклона к горизонту. Примерно такой, чтобы боковые лучи образовывали с их поверхностью угол, близкий к перпендикулярному. Поэтому, может оказаться так, что боковые наклонные солнечные лучи могут быть наиболее эффективны (рис III.4.5, а.). Это положение доказывает классический опыт известного агрофизика, основателя школы агрофизики света и растений, Б.С.Мошкова (см. «*К вопросу о...*»). В этом эксперименте, на опытных делянках растения лишались света (прикрывались) на 3 часа в день: одна группа растений прикрывались на 3 часа утром (вариант «утро»), другая – днем (вариант «день») и третья вечером, с 17 до 20 часов (вариант «вечер»). Контролем служили растения, выращенные при непрерывном освещении, биомасса которых была взята 100%. Результаты этого опыта приведены на рис. III.4.5, б

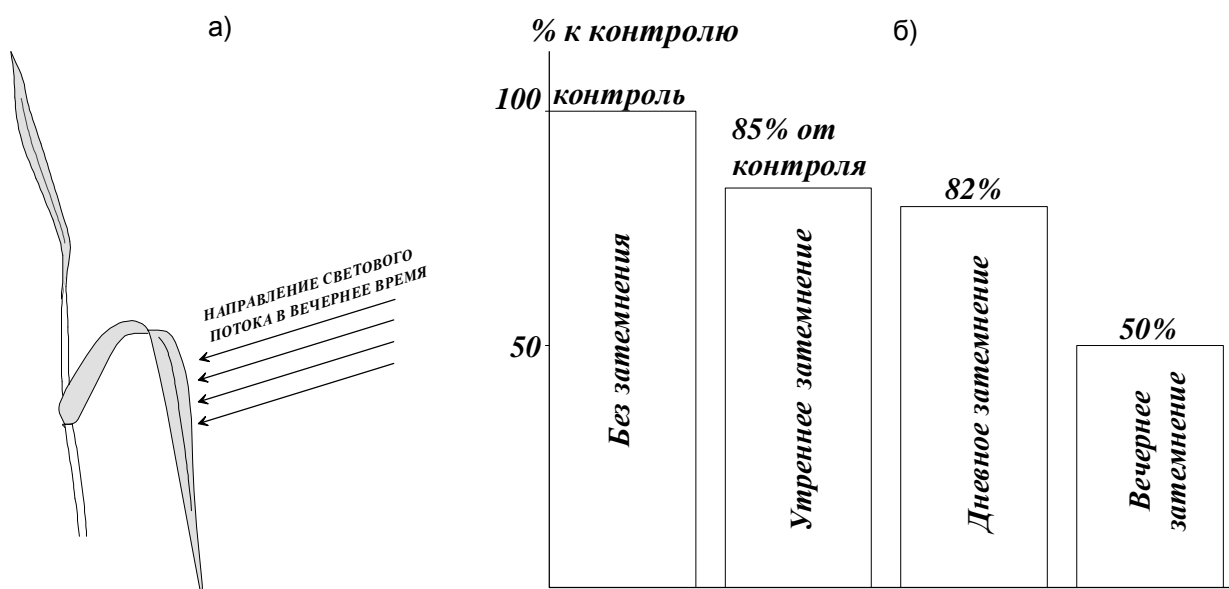


Рис. III.4.5. Схема расположения листа злаков к направлению светового потока (а) и результаты опыта Б.С.Мошкова по влиянию утреннего, дневного и вечернего света (б)

Как видно из приведенного рисунка III.4.5 (б) в наибольшей мере на растения повлияло лишение их вечернего света – урожай сократился наполовину. В меньшей мере влияло на растения затемнение днем, еще меньше – утром. Утром, - это вполне понятно; как правило, утром еще достаточно прохладно и фотосинтетические механизмы «работают» заметно медленнее. Оптимум и температуры, и направления падения световых лучей – это вечерняя пора. Поэтому так важен для растений именно свет вечернего солнца, наиболее продуктивный.

Важен этот вывод и для условий закрытого грунта: необходимо размещать осветители не просто вверх, а учитывать расположение листьев, выращиваемых растений. Размещать осветители лучше всего так, чтобы световой поток был направлен перпендикулярно к поверхности листьев. Нередко, не сверху, а сбоку от растений. Во всяком случае, для растений с ланцевидными листочками (лук, нарциссы и др.) такое расположение осветителей дает заметный (в несколько раз!) прирост урожая.

#### Великие светофизиологи растений

*К вопросу о....*

В большинстве случаев анализ факторов влияния Солнца на произрастание растений выделял прежде всего недостаток тепла. Действительно, от 60° с. ш. до 35° с.ш., т.е. от Санкт-Петербурга до Ташкента света растениям достаточно, а вот тепла – нет. На широте Санкт-Петербурга растениям света хватает для роста растений в течение 9 месяцев в году, а вот тепла – только на 5-6 месяцев. В Ташкенте – тем более, света достаточно в течение всего года, а вот тепла только для роста в течение 8-10 месяцев. Наверное, именно поэтому, в первый период становления агрофизики внимание физиологов и агрофизиков в большей степени было обращено на изучение влияния теплообеспеченности, а не на особенности светофизиологии растений. Однако, великие физиологи уже с начала 20-го века все больше внимания стали уделять влиянию света на развитие растений.

Считается, что впервые на высокое биологическое значение интенсивности света и его периодичности указали американские физиологи Гарднер и Аллар (1920). Именно они и разделили растения на короткодневные, способные цвести при коротком световом дне, длиннодневные, зацветающие при длинном дне, и нейтральные, цветущие и при любой долготе светового дня.

Российская школа светофизиологии берет свое начало с работ великого физиолога, Андрея Сергеевича Фаминцына (1835-1918), который впервые доказал, что фотосинтез может происходить и при

свете керосиновой лампы. Впоследствии это направление получит название экологической физиологии растений, - науки, изучающей зависимости процессов в растениях от внешних экологических факторов. Ее бурное развитие в начале 20-го века связано с великим физиологом, выпускником Московского университета Владимиром Ивановичем Палладиным (1859-1922), хотя наиболее известны его работы по физиологии дыхания. Видимо, основоположником экологической физиологии растений и светофизиологии его можно считать и потому, что он воспитал плеяду великих физиологов растений - С. П. Костычев, Н. А. Максимов, Д. А. Сабинин – какие имена! Его ученик В.П.Мальчевский был первым руководителем лаборатории светофизиологии, которая была создана в Физико-агрономическом институте, который затем был переименован в Агрофизический институт. Уникальность этого института и созданной лаборатории светофизиологии в том, что именно в этом институте впервые для исследования процессов в растениях применяли новейшие достижения физики. Вполне понятно, - основателем института был Абрам Федорович Иоффе (1880-1960), который в свои молодые годы работал ассистентом у В.Рентгена, где и защитил степень доктора философии. Но наибольшую известность лаборатория светофизиологии приобрела при профессоре Б.С.Мошкове, который открыл многие законы фотопериодизма, - явления, обуславливающего и продуктивность, и скороспелость, и зимостойкость, и многие другие аспекты устойчивости растений. Поэтому имя этого великого светофизиолога и агрофизика, поставившего такие впечатляющие замечательные опыты, так часто упоминается на страницах этого учебника. А какие замечательные помидоры он и его ученики выращивали при искусственном освещении, используя законы фотопериодизма и светокультуры, - до 4-х ведер томатов с одного куста! Это ли не самое яркое свидетельство значения науки для практики?!

### Влияние интенсивности света на параметры роста

Интенсивность светового потока в определенном диапазоне мощности лучистой энергии линейно влияет на удельный вес листьев. Экспериментальные данные, приведенные на рис. III.4.6 (рис. III.4.6, по Jurik et al) хорошо это подтверждают. Однако, мы хорошо помним (см. Главу III.1), что фотосинтез зависит от освещенности в виде куполообразной функции, имеющей оптимум области мощности светового потока в диапазоне 500-800 Вт/м<sup>2</sup>, что близко к солнечному полуденному освещению.

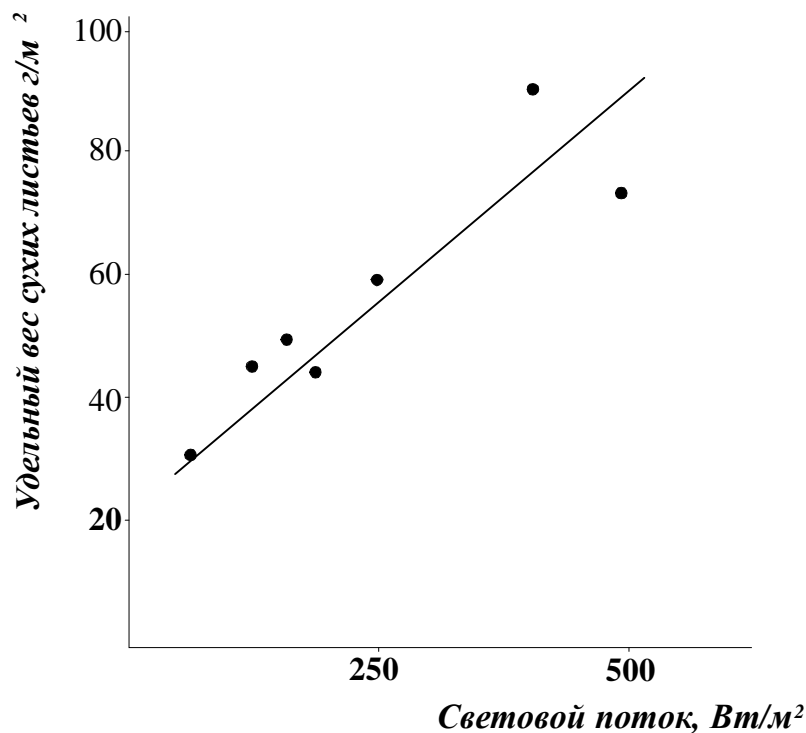


Рис. III.4.6. Зависимость удельного веса сухих листьев (г/м<sup>2</sup>) растений *Fragaria virginata* от интенсивности светового потока (по Jurik et al, 1979)

Причем многочисленные исследования подтвердили вид этой зависимости как для светолюбивых, так и теневыносливых форм растений. Эти два типа растений различаются от способности усваивать световую энергию. При одной и той же интенсивности освещения фотосинтез светолюбивых протекает интенсивнее, чем у теневыносливых (рис. III.4.7), особенно при высоких значениях интенсивности света. А вот теневыносливые более «бережно» относятся к поступающей лучистой энергии: при малых значениях светового потока фотосинтез у них протекает несколько интенсивнее, чем у светолюбивых. Эти особенности поведения растений в отношении света учитываются в параметре светочувствительности или теневыносливости, – начальном наклоне световой кривой фотосинтеза. Остановимся на физической основе этого явления.

Явление светочувствительности или теневыносливости связано, по-видимому, с тем, что у этих групп растений различия заключаются, прежде всего, не столько в работе самого фотосинтетического аппарата, а в условиях (пути, проводимости) доставки фотонов к пигментам. Одна из гипотез предполагает, что у теневыносливых растений светопроводимость возрастает, а вот емкость световой системы снижается. Попробуем с помощью этих физических параметров, – проводимость и емкость светопроводящей системы растений, объяснить и некоторые другие факты, касающиеся поведения растений в условиях недостатка света.

#### Фотосинтез

(ассимиляция  $CO_2$ , мг/дм<sup>2</sup> ч)

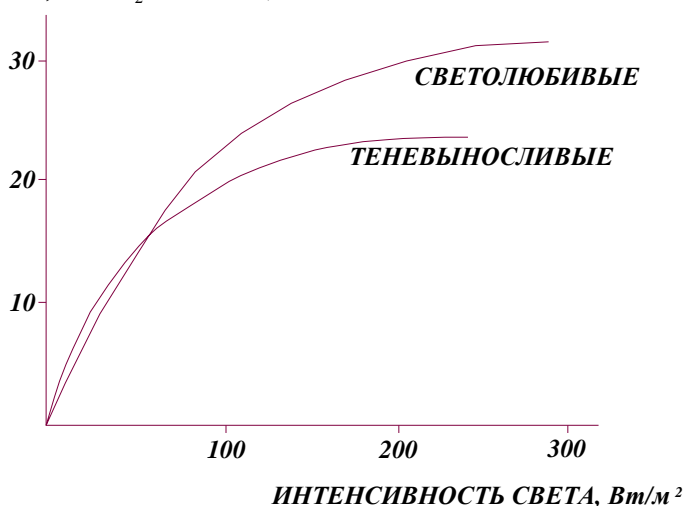


Рис. III.4.7. Световая кривая фотосинтеза для светолюбивых и теневыносливых растений.

Известен факт увеличения удельной поверхности листьев при снижении лучистого потока. Это также подтверждает гипотезу о том, что основным фактором, влияющим на увеличение удельной поверхности листьев в ответ на затенение является уменьшение некоторых компонентов фотосинтетической системы, которые ответственны за емкость и проводимость светового потока.

Также отмечен факт, что при уменьшении светового потока, при затенении растений наблюдается эффект, приводящий к увеличению доли сухой биомассы, сосредоточенной в листьях, в общей сухой биомассе растений. То есть к увеличению отношения площади листьев к биомассе растений, «листового массового отношения» ( $A_{y\partial\_м}$ ) (см. Главу III.5). Однако, этот эффект меньшего значения, чем эффект возрастания удельной площади листьев, т.е. отношения площади листьев к массе листового материала ( $A_{y\partial\_л}$ ). И этот факт может интерпретироваться в пользу высказанной выше гипотезы об уменьшении емкости и проводимости светопроводящей части фотосинтетической системы в случае затенения растений.

Впрочем, природа этих процессов изучена слабо, имеются разнообразные данные, что только позволяет надеяться о разработке единого механизма влияния затенения на параметры роста растений. Но однозначно можно сказать, что затенение действует на интенсивность накопления продукции, причем по-разному на теневыносливые и тенечувствительные растения. Это хорошо видно из таблицы III.4.7.

Табл. III.4.7.

Параметры роста теневыносливых (*Impatiens parviflora*) тенечувствительных (*Helianthus annuus*) растений в зависимости от относительной интенсивности светового потока (по Bjorkman, 1981).

Параметры роста	Растения	Относительный поток световой энергии				
		100	50	22	10	5
Индекс результирующего накопления (ИРН), $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нед}^{-1} \cdot 10^{-3}$	теневыносливые тенечувствительные	61	52	31	20	12
		68	55	29	20	5
Относительная скорость роста, $\text{г} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{нед}^{-1}$	теневыносливые тенечувствительные	0.80	0.93	0.73	0.64	0.43
		1.10	1.01	0.63	0.37	0.09
Удельная площадь листьев (Ауд <sub>л</sub> ), $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot 10^{-3}$	теневыносливые тенечувствительные	32	43	53	71	80
		26	32	43	41	36
Удельная масса листьев (Ауд) $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$	теневыносливые тенечувствительные	0.41	0.43	0.44	0.45	0.45
		0.61	0.57	0.54	0.47	0.46

Отметим, прежде всего, насколько интенсивнее реагирует фотосинтетический аппарат у тенечувствительных растений. Об этом говорит такой параметр, как индекс результирующего накопления (ИРН), - отношение прироста биомассы в единицу времени для единицы площади листа. ИРН уменьшается у тенечувствительных в 13.6 раза, а у теневыносливых – всего в 5 раз при уменьшении светового потока в 20 раз. Во многом это конечно связано с увеличением удельной площади листьев (т.е. площади листьев к их массе) у теневыносливых растений. Листья у них становятся тоньше, световой поток скорее достигает фотосинтетического аппарата, его потери на светоперенос в листе меньше (сравните, удельная площадь листьев у теневыносливых возросла в 2.5 раза, а у тенечувствительных – в 1.4 раза, при этом масса листьев по отношению к массе растения, удельная масса листьев, у выносливых осталась та же, а у тенечувствительных – снизилась в 1.33 раза). Таким образом, приспособительные реакции теневыносливых растений приводят к тому, что световой поток скорее достигает зерен хлорофилла, меньше отражается и диффузно превращается по мере его достижения. Отсюда и большая эффективность его работы у теневыносливых растений.

Кроме того, имеются и важные качественные изменения у растений при их затенении. Затенение или загущение посевов в период от закладки листьев до формирования колоса резко уменьшает количество оплодотворенных цветков и, соответственно, уменьшает количества семян в колосе.

### Фотопериодичность. Свет как фактор онтогенеза

Хорошо известен факт, что длительность светового дня является одним из основных факторов, регулирующим наступления стадий растений, особенно древесных, в онтогенезе. Например, длительность светового дня является регулятором для подготовки



деревьев к зиме: они запасают вещества, сбрасывают листья и пр. Это очень важно: именно такой космический фактор, как длительность светового дня ответственен за осуществление фаз в онтогенезе многолетних растений и, соответственно, их «привязке» к определенной природно-климатической зоне. Поэтому существование растения в определенной природно-климатической зоне оказывается тесно связанной с фотопериодичностью, с длительностью светового дня.

Давно известны факты, когда северные сорта оказываются совершенно непригодными на юге. Это особенно касается древесных культур и кустарников. Сначала существовало мнение, что на эти северные виды плохо воздействуют повышенные температуры, а вовсе не такой космический фактор, как долгота светового периода. Рассмотрим это на примере одного классического опыта, проведенного проф. Б.С.Мошковым. Черенки северных видов черной смородины и ивы выращивали близ Ленинграда и Сухуми при естественном световом дне (14 и 10 часов, соответственно) и при дополнительном освещении. При естественном освещении в Сухуми растения быстро прекращали рост, сбрасывали листву и оставались карликовыми. А в условиях Ленинграда, при 14-часовом световом дне растения выглядели совершенно нормальными. Если дополнительным освещением в Сухуми световой день доводили до 14 часов, то растения росли мощно, высоко, совершенно изменив свою физиологию. Таким образом, даже в теплых, субтропических условиях укорачивание светового дня приводило к тому, что северные виды начинали готовиться к зиме, - сбрасывали листья, прекращали рост и пр. Это доказывает, что фотопериодичность, длительность светового периода – основной фактор регулирования стадий онтогенеза у древесных и кустарниковых растений.

С отмеченными явлениям связана и зимостойкость растений. Действительно, устойчивость к холодам будет определяться тем, насколько растение хорошо подготовилось к зиме: прекратило рост, сбросило листву. А регулятором к началу подготовки к зиме является длительность светового дня, того природного фактора, в котором формировалось растение, что и закрепилось генетически. Становятся тогда понятными и следующие факты: многие маньчжурские и вообще дальневосточные виды вымерзали в Подмосковье, хотя зимы на Дальнем Востоке могут быть и посуровее, чем в зоне южной тайги. Теперь это понятно: осенний день в Подмосковье был достаточно длинным для этих растений, привыкших к короткому световому дню. Они не успевали подготовиться к зиме и, неподготовленные, вымерзали в течение подмосковной зимы.

Таким образом, морозоустойчивость многолетних растений зависит в первую очередь не от зимних холодов, а от световых условий в течение периода, предшествующего перезимовке. А механизм этого явления – фотопериодический. Он заключается в том, что укорачивание светового дня является пусковым механизмом подготовки растений к зиме, - растение сбрасывает листья, формирует запасы. И если растение таким образом подготовлено, оно оказывается зимостойким.

#### *Определения*

**Фотопериодический механизм** является основным регулирующим фактором подготовки древесных и кустарниковых растений к зиме: укорачивание светового дня приводит к сбрасыванию растением листьев, формированием запасов и пр.

**Зимостойкими** оказываются только те особи и виды, которые в данных световых и климатических условиях успевают до наступления холодов закончить рост и подготовиться к зиме.

**Зимостойкость** определяется генетическими особенностями вида, связанными с длительностью светового дня.

## Литература

Тоомиг Х. Т. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат. 1977. 200 с.  
McGre R. J. Practical applications of action spectra. In Light and Plant development. 1986. Ed.  
H. Smith. Butterworths. London. 515 p.

Jurik T. W., J.F. Chabot, B.F. Chabot. Ontogeny of photosynthetic performance in *Fragaria virginiana*  
under changing light regime. Plant Physiol., 1979. Vol 63, 542-547.

### Глава III.5. Рост, развитие и формирование продуктивности

Один из величайших физиологов растений, Д.А.Сабинин, указывал, что «рост – это новообразование элементов структуры». А развитие – это, по его мнению, - «изменения в новообразовании элементов структуры организма, обусловленные прохождением организмом жизненного цикла» (см. литературу к данной части). Поэтому, эти важнейшие понятия неразрывны и, конечно, должны рассматриваться совместно, особенно, при рассмотрении продуктивности агроценозов. Лишь для удобства изучения, мы в данном случае будем несколько упрощенно, чисто физически рассматривать рост растений. А именно – как возрастание массы и линейных размеров (объема) отдельных частей растений, индивидуального растения и агроценоза в целом, происходящее вследствие увеличения числа и размеров клеток и неклеточных образований. А развитие – как процесс тесно связанных с ростом качественных изменений (дифференциация тканей, органов, прорастание семян, созревание и пр.), происходящее в течение жизни растения, в процессе онтогенеза. В агрономической науке рост и развитие сельскохозяйственных посевов рассматривается как процесс значительно более сложный, многофакторный, регулирование которого должны быть очень точным и во времени и в пространстве. Основы такого точного земледелия заложили великие российские агрономы (см. «К вопросу о...»).

*К вопросу о...*

Корифеи российской агрономической науки

Рассказать обо всех великих российских ученых-агрономах конечно невозможно. Да и многие вопросы представляются спорными. Кто был первый ученый-агроном? Великий М.В.Ломоносов с его сочинением «О слоях земли»? М.И.Афонин - первый профессор сельскохозяйственного домоводства в МГУ? На наш взгляд, это был Андрей Тимофеевич Болотов (1738-1833). В это время в европейской агрономической науке господствовала теория Ван Хельмонта. Так называемая «водная теория» питания растений, которая основывалась на опытах фламандского алхимика Яна Батиста Ван Хельмонта (1577-1644). Ван Хельмонт выращивал деревья в предварительно взвешенном количестве почвы. Затем он лишь поливал деревья. За 5 лет дерево прибавляло до 74 килограмма, а вот почва теряла только несколько десятков граммов. Вывод Ван Хельмонта: дерево строит свое тело в основном не из почвы, а только из воды. И зольные элементы растения создают из воды. А вот Андрей Тимофеевич совершенно четко в своем трактате «Об удобрении земель» пишет об условиях необходимых для растений: 1) в почве должны в достатке те элементы, из которых состоит растение, 2) почва должна быть в таком состоянии, чтобы растения легко потребляли эти элементы и 3) вода и воздух должны быть в почве тоже в достатке. И о задачах агрономии А.Т.Болотов пишет: «...удобрение земель не в чем ином состоять не может, как либо в преумножении в землю помянутых плодоносных и хлебородие производящих частиц, либо в отвращении и уничтожении помянутых препятствий...» (цит по А.П.Бердышев, 1988). Можно утверждать, что Болотов был и основоположником и системы земледелия, так как предложил выгонную систему земледелия.

А вот следующий расцвет российской агрономической науки, науки о почве приходится на вторую половину XIX века. Пало крепостное право... Надо было учиться хозяйствовать на российских малоплодородных северных землях. А тут еще засухи, голод... И опять российские ученые не смогли найти ответа в трудах европейцев. Так и писал великий естествоиспытатель и агроном, профессор (точнее - «ссылный профессор», уже в 39 лет сосланный в Смоленскую губернию, где и ставил свои полевые опыты) агрономической химии в Петербургском земледельческом институте Александр Николаевич Энгельгардт: «Нет химии русской, английской или немецкой, есть только общая всему миру химия, но агрономия может быть русская, или английская, или немецкая.... Мы должны создать свою агрономическую науку...» (цит по И.Е.Филоненко, 2000). Он стоял во главе плеяды великих естествоиспытателей, его друзей и соратников – основателей генетического почвоведения В.В.Докучаева и П.А.Костычева, великого агронома А.В.Советова, в то время председателя сельскохозяйственного отделения Вольного экономического общества, основанного в 1765 году, чтобы «...стараться об исправлении отечественного земледелия и домостроительства», на знамени которого был начертан девиз: «Пчелы, в улей мед приносящие». Дела Вольного экономического общества в России соответствовали этому девизу, однако главным, неистощимым, вечным достатком, принесенным делами этого общества, были почвенные карты Чаславского, научные открытия В.В.Докучаева. Они и составили гордость российской науки (по материалам книг: А.П.Бердышев «Андрей Тимофеевич Болотов», М.: Наука. 1988 и И.Е.Филоненко «Особая экспедиция». М.:Изд-во «Прима-Пресс-М». 2000).

Начнем рассмотрение этих процессов с момента, когда семя попадает в почву. Сначала происходит передвижение почвенной влаги за счет градиента давления воды. Первоначально, в основном, за счет осмотической составляющей, т.е. за счет более высокой концентрации веществ в семени. Затем уже могут включаться и составляющая набухания (набухание белков) и капиллярно-сорбционная. Так вода поступает в семя. Безусловно, давление почвенной влаги, и соответственно, влажность почвы должны быть достаточно высокими, не ниже некоторого критического уровня. Только тогда возникнет перепад давлений влаги между почвой и семенем, вода начнет поступать внутрь семя. И в семени начнутся процессы метаболизма, гидролиз запасных веществ и производство новых. Для этого в работу должны включиться ферменты, интенсивность действия которых зависит от температуры. Поэтому в это время большое влияние на процесс поступления почвенной влаги в семя оказывает температура: с повышением температуры (до определенного предела) увеличивается интенсивность поглощения воды, гидролиз углеводов и белков семян, их дыхание. Для характеристики внешних условий в агрофизике обычно используют понятия критической предпосевной влажности и «критической» (кардинальной) температуры почвы на глубине заделки семян (см. Главу II.3). Если предпосевная влажность – это величина близкая к НВ, и слабо изменяющаяся в зависимости от вида растений, то кардинальная температура – очень сильно изменяется от вида растения (см.табл. II.3.1).

Достигнув определенного уровня влажности, семя начинает все более интенсивно дышать, начинается образование зародыша, выделяются его осевые органы. Дыхание резко возрастает, теперь уже мало зависит от влажности. Образуется проросток. Оказывается, что количество воды, необходимое для прорастания семени различно у различных видов растений. Так, семена бобовых, богатые белками, поглощают значительно больше влаги, чем семена злаковых растений. Много воды требуют для прорастания семян льна и сахарной свеклы.

Итак, зародыш семени стал проростком. Появились колеоптиле и зародышевые корни. Из колеоптиле, т.е. трубочки, охватывающей первый лист, будут развиваться в будущем стебель и листья. Интенсивно растут зародышевые корни. И, наконец, проросток достигает поверхности почвы, появляется росток. Начинается фаза всходов. Первый лист выходит через верхушку колеоптиле, поле начинает зеленеть. Это момент очень важен – растение переходит на автотрофное питание, начинается процесс фотосинтеза, начинается интенсивный рост растений. Идет нарастание биомассы, формирование вегетативных, а впоследствии, и репродуктивных органов растений.

Для зеленого растения, у которого фотосинтетический аппарат формирует запасы (резервы) сложных органических веществ (в основном, углеводов, а именно, крахмала и глюкозы, иногда белки), начинается новый этап роста. Теперь рост растений состоит, прежде всего, в формировании структурного вещества из запасов. Структурные вещества – это клетчатка для клеточных стенок, клеточные мембраны, ферменты и пр. Эти структурные составляющие растений являются его долговременными «кирпичиками», которые не станут вновь субстратом для роста или дыхания поддержания. Поэтому, можно определить рост, как формирование структурного вещества растений (клетчатка, мембраны, белки, ферменты) из запасов ассимилянтов фотосинтетического процесса. А общая сухая биомасса растений в каждый момент времени состоит из созданного структурного вещества и существующих на данный момент резервов.

### **Основные параметры роста и развития**

В целом, весьма упрощенно общий прирост биомассы ( $DM$ ) агроценоза можно определить как разность между суммарным фотосинтезом и затратами на дыхание

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \Phi - R, \text{ где } DM - \text{увеличение биомассы за время } t, \text{ а } \Phi \text{ и } R - \text{фотосинтез и}$$

дыхание.

Увеличение биомассы во времени нередко функционально связывают с процессами фотосинтеза и дыхания, что позволяет формировать динамические модели роста. В частности, используют общую запись уравнения роста в виде

$$\frac{dM}{dt} = e(\bar{\Phi} - \bar{R}),$$

где  $\bar{\Phi}$  - суммарный фотосинтез растения,  $\bar{R}$  - суммарное дыхание,  $e$  - коэффициент перехода от массы усвоенной  $\text{CO}_2$  к сухой биомассе. Этот коэффициент может иметь строго определенные значения. Если рассматривать в виде первичных продуктов фотосинтеза углеводы, то  $e$  в этом случае будет составлять величину 0.67 (г сухой массы/г  $\text{CO}_2$ ). В каждом конкретном случае следовало найти величину  $e$ , как характеристику перехода от фотосинтеза и дыхания к сухой биомассе.

Этот подход – динамический, рассматривающий динамику формирования биомассы, изменение биомассы как формирующуюся в каждый момент времени разность между фотосинтезом и дыханием. Наряду с динамическими моделями используют, как известно, и балансовые. Для описания ростовых процессов одна из таких моделей предложена Ивановым (цит. Х.Т.Тоомингу, 1984):

$$M - m = fPt - aP_1t_1,$$

где  $M$  – сухая биомасса всего растения за конкретный период,  $m$  – масса опавших частей растений,  $f$  – интенсивность фотосинтеза,  $P$  – рабочая поверхность или масса,  $t$  – время, в течение которого происходил фотосинтез,  $a$  – интенсивность дыхания,  $P_1$  – дышащая масса,  $t_1$  – время дыхания.

По сути, уравнение Иванова также связывает процесс роста с разностью, с балансом процессов фотосинтеза и дыхания. Но в нем подчеркивается еще и значение рабочей фотосинтезирующей поверхности и продолжительности ее функционирования. То есть подчеркивается роль листовой поверхности и длительности светового периода для формирования биомассы растений.

Кроме того, как уже говорилось выше в главе «Фотосинтез и дыхание», в большинстве современных подходов фитомасса представляется в виде двух составляющих – структурной и запасной (резервной). Запасы образуются в виде углеводов, а структурная биомасса – это разделенные ткани растений, в виде клетчатки, белков и пр., которые, единожды образовавшись, практически не изменяются в течение всего онтогенеза растений. Поэтому, для биомассы растений более строго можно было бы написать:  $M = M_c + M_s = M_c + V(C, N)$ , где  $M$  – общий вес фитомассы,  $M_c$  – вес структурной составляющей биомассы,  $V$  – объем ткани или целого органа, в котором концентрации углеводов и азота составляют  $C$  и  $N$ .

Итак, основным параметром роста выступает прирост биомассы. Он в значительной мере определяется площадью ассимилирующей листовой поверхности, которая в свою очередь, определяет и эффективность использования ФАР и результирующий фотосинтез. Именно поэтому, в процессе роста важно знать, как распределяются ассимилянты между органами. Обычно, в начальный период после появления ростков основные ассимилянты идут на постройку листьев, увеличение площади листового аппарата. Затем, по мере старения, перераспределение запасенных и новых ассимилянтов изменяется. Они в большей степени расходуются на прирост репродуктивных органов. Поэтому при количественном описании процессов роста необходимо знать функции распределения ассимилянтов между органами. Эти функции специфичны для каждого растения. А аргументом, который определяет эти функции распределения, должен быть опять-таки некий физический фактор среды, при достижении критического значения которого функция распределения меняется. Такой физический параметр, связанный непосредственно с фазами развития и ростом, мы уже знаем, - это сумма эффективных

температур. Так, при достижении некоторой суммы температур рост корней уменьшается, а рост листьев увеличивается. При дальнейшем увеличении этой суммы будет наступать фаза развития, когда ассимилянты будут поступать в основном в репродуктивные органы, в колосья зерновых, в клубни корнеплодов и т.д. Это общий подход к описанию процесса развития в онтогенезе. Однако, существует ряд приспособительных реакций растений на изменение условий произрастания. Эти реакции можно сформулировать в одном общем правиле: «При недостатке того или иного субстрата для роста, развиваются преимущественно те органы, которые могут обеспечить его дополнительный приток». Примеров, подтверждающих это правило, можно привести много. Они все получены в простых экспериментах. Например, срезание части листьев растений, приводило к недостатку углеводов. Этот недостаток тут же компенсировался увеличением поверхности листьев и увеличению фотосинтеза. Если же искусственно провоцировали недостаток азота в растениях, преимущественно росли корни. И недостаток азота компенсировался увеличением его доставки из почвы разросшимися корнями. Поэтому, для роста важны не абсолютные количества углеводов и азота, а их сбалансированность. Точнее, сбалансированность двух потоков – потока углеводов, идущего от листовой поверхности по всему растению, - потока «вниз». И потока «верх» - потока воды и минеральных веществ из почвы, через корни в листья. Это упрощенный подход к обеспечению процесса роста и позволяет его схематизировать и формализовать.

#### Определения

**Процесс роста** – процесс увеличения массы и объема растения или его частей за счет увеличения числа и размеров клеток и неклеточных образований, продолжающийся у растений на протяжении всего онтогенеза и обязательно сопровождающийся процессом развития.

**Рост** - формирование структурного вещества растений (клетчатка, мембраны, белки, ферменты) из запасов ассимилянтов фотосинтетического процесса. Общая биомасса растений в каждый момент времени состоит из созданного структурного вещества и резервов.

**Развитие** – процесс закономерных качественных изменений в виде прорастания семян, дифференцировки органов, созревания, старения органов и организма в целом. Процессы роста и развития следует рассматривать совместно, как единый необратимый процесс жизнедеятельности растений.

Фитомасса разделяется на двух составляющих – структурную и запасную (резервную). Запасная образуется в виде углеводов, а структурная биомасса – это разделенные ткани растений, в виде клетчатки, белков и проч., которые, единожды образовавшись, практически не изменяются в течение всего онтогенеза растений. Поэтому, биомассу растений представляют в виде суммы:  $M = M_c + M_z = M_c + V(C, N)$ , где  $M$  – общий вес фитомассы,  $M_c$  и  $M_z$  – веса структурной и запасной составляющих биомассы,  $V$  – объем ткани или целого органа, в котором концентрации углеводов и азота составляют  $C$  и  $N$ .

Для количественного описания процессов роста и развития необходимо знать закономерности распределения ассимилянтов между органами. Функции распределения ассимилянтов растений изменяются при достижении некоторого критического значения фактора, которым, как правило, выступает сумма эффективных температур.

Регуляция ростовых процессов в онтогенезе происходит благодаря сбалансированности двух потоков: потока синтезированных в процессе фотосинтеза углеводов «вниз», и потока воды и минеральных веществ из почвы «вверх». Разбалансированность этих потоков приводит к преимущественному росту того органа, который «ответственен» за тот или иной поток.

#### Параметры роста

Чуть раньше мы уже отметили, что основными параметрами роста будут общая фитомасса –  $M$  и общий (или абсолютный) прирост биомассы ( $DM$ ). Можно также использовать и относительный прирост ( $DM/M$ ), а также абсолютную ( $\frac{\Delta M}{\Delta t}$ ) и

относительную  $\frac{\Delta M}{M \cdot \Delta t}$  скорости роста. Эти показатели являются наиболее общими и наиболее часто употребляемыми. Они указывают на общее состояние растений, увеличение его продуктивности. Но вот об эффективности работы фотосинтезирующего аппарата растения эти классические показатели мало что говорят. Поэтому используют другие характеристики, прежде всего связанные с площадью поверхности листьев ( $A$ ):

1. Индекс листовой поверхности,  $ИЛП = A/S$ , - отношение площади листьев к площади всего посева. Как показатель роста и развития  $ИЛП$  используется нечасто. Чаще этот показатель используют в различного рода моделях для расчета транспирационного расхода посевами. Однако, он может характеризовать и состояние посевов на данный момент и особенно, в процессе роста и развития растений. Кроме того, продуктивность растений, особенно при невысокой освещенности, зависит не от потенциальной освещенности площади листьев, а от реальной общей площади освещенных листьев. Растения, находящие при недостатке света всегда «решают» дилемму: активная фотосинтетическая площадь должна быть наибольшей, но в тоже время, минимальна, должна быть взаимозатененность листьев. Поэтому нередко используют другие параметры производительности листового аппарата, также основанные на использовании площади листьев ( $A$ );

2. Отношение площади листьев к биомассе растений, «листовое массовое отношение» ( $A_{y\partial\_m}$ ), как отношение площади листьев к биомассе всего растения:  $A_{y\partial\_m} = A/M$ . Этот показатель действительно характеризует фотосинтетическую работу листового аппарата, и чем он меньше, тем эффективнее работает фотосинтетический аппарат растения.

3. Удельная площадь листьев ( $A_{y\partial\_л}$ ), как отношение площади листьев к массе листового материала, ( $M_{л}$ ).

4. Удельная масса листьев ( $A_{y\partial}$ ), как отношение массы листьев ( $M_{л}$ ) к биомассе всего растения ( $M$ ). Это отношение указывает на распределение биомассы растений и на долю листьев во всей биомассе, что в целом характеризует кумулятивный фотосинтетический процесс.

Нетрудно заметить, что листовое массовое отношение связано с двумя другими листовыми параметрами соотношением:  $A_{y\partial\_m} = (A_{y\partial\_л}) \times (A_{y\partial})$ . Так что по двум из них всегда можно вычислить третье.

И все же, наряду с параметрами, характеризующими фотосинтетическую активность листьев, требуются общие, для всего растения или посева, величины. И просто биомасса или ее прирост, и даже относительный прирост ( $DM/M$ ) не характеризуют интенсивность аккумуляции сухого вещества растений, эффективность накопления растением биомассы. Для этого используют другой показатель:

- интенсивность результирующего накопления ( $ИРН$ ) или нетто-аккумуляция:  $ИРН = \frac{\Delta M}{A \cdot \Delta t}$ . Этот показатель является суммарным показателем эффективности накопления веществ растением и учитывает разницу двух процессов - фотосинтеза и дыхания в величине  $DM$ . Он отражает баланс этих процессов накопления и расходования, - отсюда и одно из названий: «нетто-аккумуляция». Для этого показателя можно записать понятийное выражение, отражающее сущность двух процессов, формирующих накопление растительной продукции

$$ИРН = [(средняя\ дневная\ фотосинтетическая\ скорость) \times (длительность\ светового\ периода)] - [(среднесуточная\ скорость\ дыхания) \times (сутки)].$$

Сами за себя говорят и примерные величины *ИРН* для различных растений: травянистые растения – 30-70 г/м<sup>2</sup> неделю, сосна - 9-12, лиственница – 4-5 г/м<sup>2</sup> неделю.

Совершенно ясно, что наиболее эффективно работает накопительный аппарат у травянистых растений, значительно медленнее – у древесных, среди которых тоже заметны различия.

Очень важно отметить, что рассмотрение этого показателя в динамике за вегетационный период может много сказать об особенностях процесса накопления и расходования веществ растениями. На рис. III.5.1 представлена динамика этого показателя для двух различных древесных культур. 1-ая кривая – это классическая кривая изменения *ИРН* за вегетационный период, когда самое эффективное накопление веществ наблюдается в середине лета, в период наибольшей интенсивности фотосинтеза. Затем *ИРН* снижается, так как снижается и площадь листьев, но более быстро – интенсивность фотосинтеза. Но вот кривая 2 (а она характерна для некоторых видов древесных культур) имеет максимум в интенсивности накопления к концу лета, в начале осени. Этот поздний максимум связан с тем, что к концу лета у многих растений начинают опадать листья, наблюдается увеличение оттока ассимилянтов в корни. Вследствие этого резко увеличивается рост подземных частей растений, возрастает общая биомасса при заметном снижении площади листьев. Как следствие – увеличение *ИРН*.

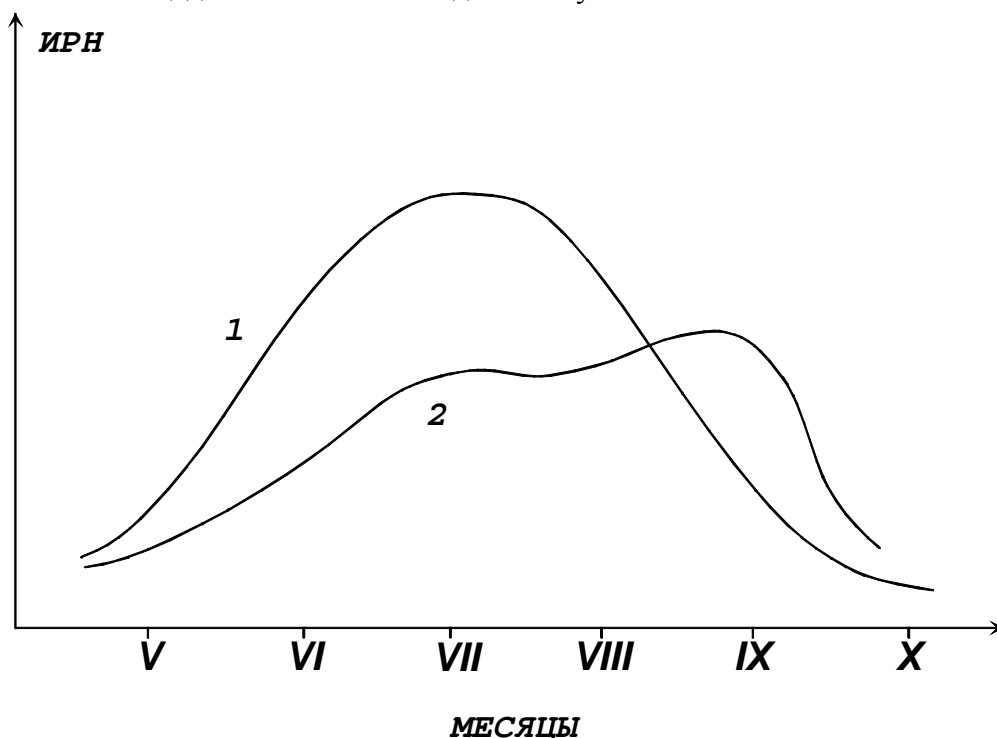


Рис. III.5.1. Динамика индекса результирующего накопления (*ИРН*, г/м<sup>2</sup> неделю) в течение вегетационного сезона для интенсивно вегетирующих растений без фазы оттока ассимилянтов в корни (1) и в случае осеннего оттока ассимилянтов в подземные органы при заметном увеличении их биомассы (2).

Для того чтобы ориентироваться в сравнительном использовании указанных параметров, уметь получать информацию из приведенных величин, рассмотрим один пример, взятый из лесоводства. В табл. III.5.2 приведены основные показатели роста 4-х летних деревьев в виде общей биомассы, прироста и относительного прироста, площади листьев и параметров, характеризующих накопительные процессы – «листовое массовое отношение»,  $A_{уд\_м}$ , и *ИРН*. Как видно из этой таблицы, о лиственницах можно сказать следующее: лиственница Сукачева растет заметно интенсивнее, у нее уже к 4-му году



биомасса выше почти в 3 раза. Прежде всего, - за счет большей площади листового аппарата и заметно более высокой его эффективности. У дуба заметно ниже площадь листьев, но биомасса к 4-му году почти такая же высокая, как и у лиственницы Сукачева. Это результат заметно более высокой эффективности работы накопительного аппарата (почти в два раза выше  $ИРН$  и заметно ниже  $A_{уд\_м}$ , чем у лиственницы). При этом следует учитывать, что у дуба период аккумуляции веществ и роста фитомассы короче, чем у лиственниц. Причины указанных различий – в генетических особенностях растений, в особенностях их физиологии, которые мы здесь не обсуждаем.

Табл. III.5.2

## Основные показатели роста развития некоторых 4-летних древесных культур

Древесные породы	Биомасса, $M$ , кг	Площадь листьев, $A$ , $см^2$	Абс. прирост, $\Delta M$ , кг	Отн. прирост, $\Delta M / M$ , %	$ИРН$ , $г/см^2$ год	$A_{уд\_м}$ , $см^2/кг$
Лиственница сибирская	15	1770	9.5	62	5.37	118
Лиственница Сукачева	45.8	3407	28	60	8.22	74.4
Дуб	43	810	14	50	17.3	18.8

Таким образом, самыми общими показателями роста являются биомасса, прирост, скорость роста и относительная скорость роста, которые характеризуют результирующий процесс накопления веществ в растении. Показатели с участием площади листового аппарата, определяются как биомассой растений, ее приростом, а также фотосинтетической сущностью этих процессов, - параметрами с участием площади листового аппарата: «листовое массовое отношение» ( $A_{уд\_м}$ ), «удельная площадь листьев» ( $A_{уд\_л}$ ) и удельная масса листьев ( $A_{уд}$ ), а также самый важный параметр – нетто-аккумуляция или индекс результирующего накопления -  $ИРН$ . И для относительной скорости роста можно записать следующее соотношение:

$$(\text{относительная скорость роста, } \frac{\Delta M}{M \cdot \Delta t}) = (\text{индекс результирующего накопления, } ИРН) \times (\text{листовое массовое отношение, } A_{уд\_м})$$

или

$$(\text{относительная скорость роста, } \frac{\Delta M}{M \cdot \Delta t}) = (\text{индекс результирующего накопления, } ИРН) \times (\text{удельная площадь листьев, } A_{уд\_л}) \times (\text{удельная масса листьев, } A_{уд})$$

Оценивая рост и развитие, не стоит забывать и такие параметры, как КПД фитоценозов и коэффициент использования фотосинтетически активной радиации,  $КИ_{ФАР}$  (см. Главу II.1). Эти параметры хорошо отражают эффективность фотосинтеза и экономичность дыхания самих растений, характеризуют эффективность использования растениями поверхности земли. Поэтому, их использование наряду с перечисленными выше позволяет всесторонне охарактеризовать эффективность ростовых процессов.

**Влияние физических факторов на рост растений**

Зная, что рост – это есть разность между процессом фотосинтеза и дыханием, а также зная воздействие физических факторов на составляющие процесса роста, можно было бы предположить влияние тех или иных факторов на итоговый рост растений. Действительно, вспомним, что фотосинтез следующим образом изменяется под действием:

- солнечной энергии – увеличивается по логарифмическому (или логистическому) закону, где основными параметрами являются предельное насыщение (стабильный максимум фотосинтеза) и угол наклона кривой на начальном участке (чувствительность) для обычных условий освещения;
- температуры, влажности почвы – следует куполообразной (параболической) кривой, на которой имеется оптимальный диапазон, оптимум влажности и температуры;
- минеральных биофильных макроэлементов (N,P,K) - также следуя основной биологической куполообразной кривой.

В целом, закономерности аналогичного вида свойственны и процессу дыхания. Диапазоны оптимума, углы наклона кривых, конечно, отличны. Но эти закономерности остаются. Остается и общий принцип, близкий к «закону минимума»: в данных условиях уровень роста (продуктивности агроценоза, урожая) определяет фактор, находящийся дальше всего от своего оптимума. (Не забудем, впрочем, и о компенсирующем воздействии других факторов, находящихся не в диапазоне своего оптимума).

Поэтому, нередко относительную обеспеченность роста основными факторами окружающей среды можно представить в виде ряда реальных динамических кривых известных факторов. А реальные реализуемые условия для роста и развития – это будет область, ограниченная наиболее удаленными от оптимума значениями факторов. Такой подход мы уже использовали при комплексной оценке агрофизических условий, когда в поле диаграммы наносили реальные условия и критические значения физических свойств – влажность завядания, предельное сопротивление пенетрации, критическое воздухосодержание и пр. Так и в случае роста возможно представить условия практически реализуемых условий роста растений в период их развития. Такой пример приведен на рис. III.5.2. Сплошными линиями на этой диаграмме представлены некоторые динамики реальных условий (на основе ценоза в Сахаре, по К.Т.де Виту, 1986). Заштрихованная на диаграмме область – это зона фактически реализуемых условий роста. Все значения, находящиеся выше заштрихованной области и находящиеся под кривыми оптимумов, – это условия потенциального роста. На этом рисунке недостаток влаги ограничивает в наибольшей степени максимальный рост после прорастания (в мае-июне) растений, в конце июня - в июле, прежде всего, сказывается недостаток азота, а в августе – фосфора. В эти периоды воздействующие факторы находились дальше всего от своего оптимума, и поэтому сильнее всего определяли скорость роста. Результат – это лишь небольшая заштрихованная область реализованных возможностей агрофизических и агрохимических факторов. А потенциальные возможности - весьма велики. Прежде всего – реализация условий температурных и влажностных оптимумов в начале вегетационного сезона. Увеличение условий минерального питания в фазу интенсивного фотосинтеза и формирования генеративных органов. Полная реализация потенциальных возможностей среды – это основная задача научного агрофизического подхода к управлению агроценозами. Она основана, прежде всего, на знании оптимумов факторов в естественных условиях для районированных культур, и на создании потенциально оптимальных условий окружающей среды в контролируемых условиях ( в теплицах, оранжереях и пр.)

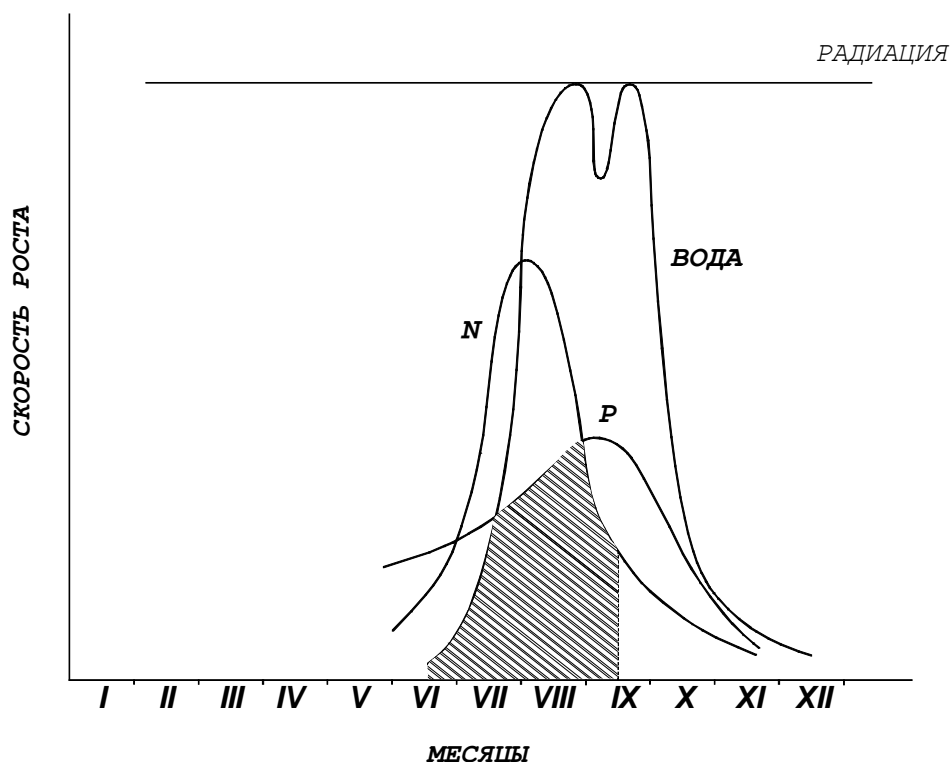


Рис. III.5.2. Рост растений при относительной обеспеченности основными факторами окружающей среды в процессе вегетации (по К.Т.де Виту, 1986). Заштрихованная область — фактически реализуемые условия роста, не заштрихованная под линией радиации — зона потенциального роста.

Однако, приведенные кривые и зависимости роста получены для отдельного растения. Как же оценить фотосинтез агроценоза? Какие параметры растений надо использовать для суммарного фотосинтеза агроценоза? Наилучшим параметром здесь является листовой индекс — отношение площади листовой поверхности к поверхности посева. Зависимость суммарного фотосинтеза агроценоза от его листового индекса представлена на рис. III.5.3. Однозначность и устойчивый вид этой зависимости указывает на то, что для оценки суммарного фотосинтеза агроценоза может быть использован листовой индекс.

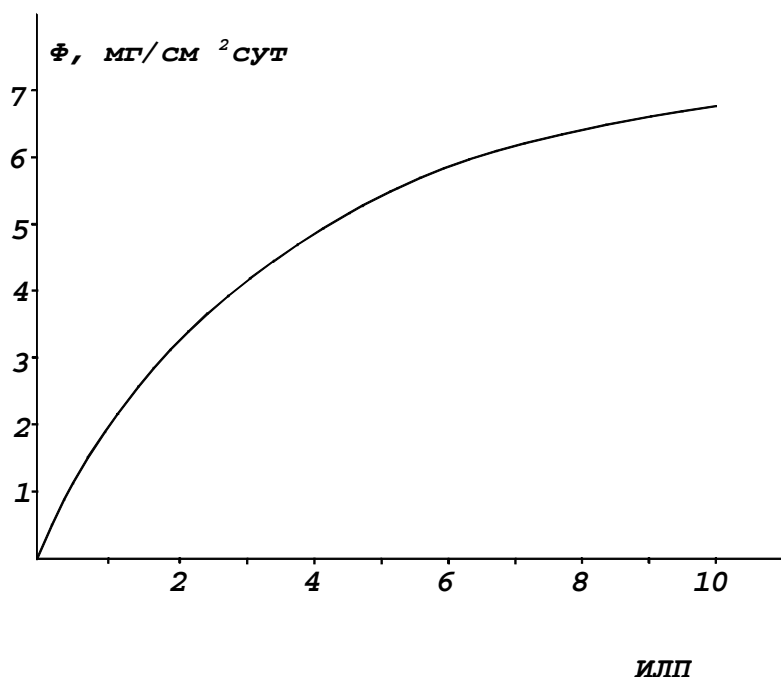


Рис. III.5.3. Зависимость суммарного фотосинтеза ( $\Phi$ ) агроценоза от его листовой поверхности (ИЛП). По О.Л.Сиротенко, 1981.

Говоря о температурных оптимумах роста и развития, следует отметить, что эти зависимости могут иметь некоторые специфические особенности в сравнении с традиционными, приведенными для процессов фотосинтеза и дыхания. Действительно, практически каждому ферменту, участвующему в том или ином процессе, свойственна своя температурная кривая, свой  $Q_{10}$ , свой оптимум воздействия. Вполне понятно, что ростовые процессы в онтогенезе могут отличаться, если внешние условия изменяются. Например, характерные ростовые кривые могут иметь различный вид при различном сочетании световых условий, «дневных» и «ночных» процессов. Например, на рис. III.5.4 приведены температурные кривые синтеза крахмала в клубнях картофеля сорта Лорх при изменении температуры в дневных и ночных условиях.

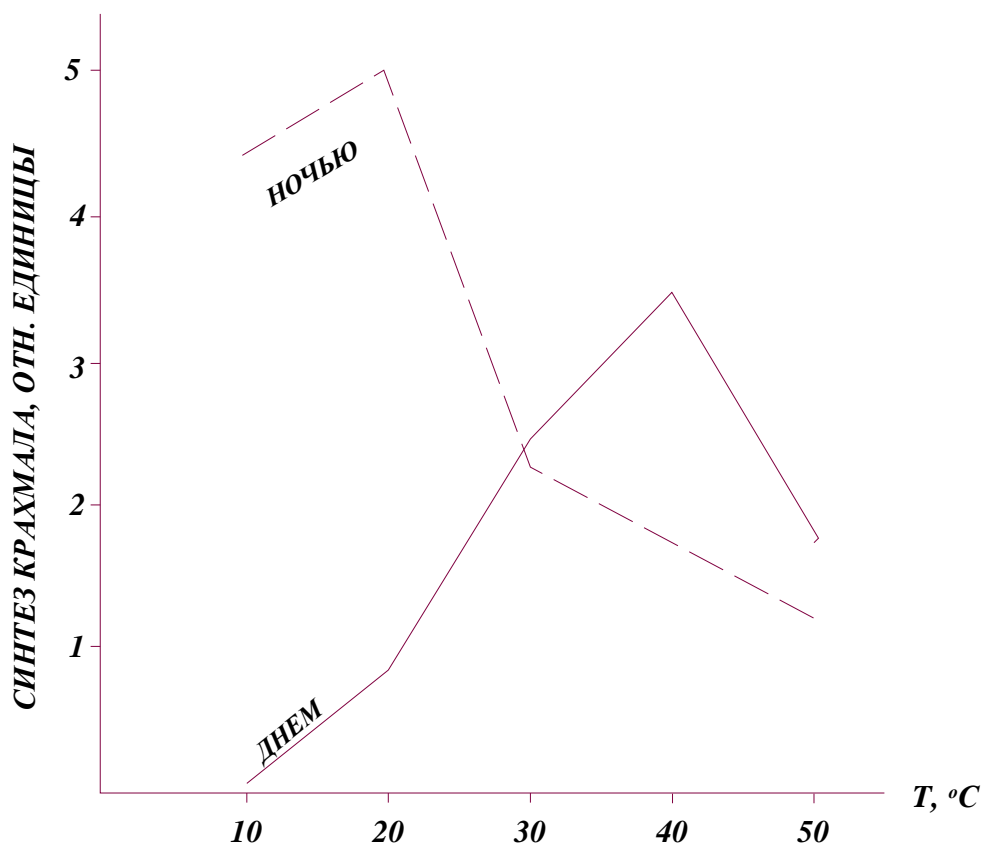


Рис. III.5.4. «Дневные» и «ночные» температурные кривые синтеза крахмала в клубнях картофеля (по Б.А.Рубину, 1959).

Удивителен факт, представленный на этом рисунке. Если растения выращиваются преимущественно в отсутствии света (ночью), то необходимы более низкие температуры для достижения максимального накопления крахмала в клубнях. А если доминируют хорошие световые условия (рост днем), то, напротив, температура воздуха должна быть повыше. Б.А.Рубин объяснял эти на первый взгляд парадоксальные факты тем, что процессы в листьях днем и ночью весьма специфичны, в них участвуют группы многочисленных ферментов, имеющие свой ритм «работы». Поэтому, так и сложилось в ходе эволюции, что в «дневных» условиях, с их повышенными температурами, эти ферментные растения «приспособились» к высоким температурам, они для них более эффективны. А вот «ночные» процессы, протекающие, как правило, при пониженных температурах, имеют максимум в области более низких температур. Это указывает, что каждое растение имеет свой специфический ритм физиологических процессов, этот ритм является достаточно устойчивым признаком, сложившимся в процессе эволюции данного вида, в процессе филогенеза.

Какое это имеет практическое агрофизическое значение? А это значит, что следует знать и учитывать приспособленность данного вида к определенному сочетанию внешних условий, причем не только для всего растения, но и для отдельных его частей. Тем более важно, для его надземной и подземной частей.

### Соотношение корневой и надземной биомассы

Когда рассматривают взаимосвязь между ростом отдельных частей растений, говорят о коррелятивном росте. *Коррелятивный рост* – взаимозависимость роста разных органов растений. Наиболее важным в коррелятивном росте является соотношение двух главных органов питания растений: корней (минеральное и водное питание) и листьев (воздушное питание и фотосинтез). Не следует забывать, что в

основе механизмов коррелятивного роста лежат фитогормональные взаимодействия. Мы же в рамках изучения агрофизики остановимся на общих закономерностях формирования потоков веществ и функциональных зависимостях этих потоков от внешних физических факторов.

*Определение*

**Закон коррелятивного роста:** каждый орган (часть) растения соответствует (коррелирует) другим органам по строению, функциям, росту и развитию.

Закон коррелятивного роста позволяет по соотношению органов реставрировать условия роста и развития растений.

Из всех предыдущих рассмотрений, нам уже известен общий принцип взаимофункционирования надземной и подземной частей растений: корни снабжают надземную биомассу питательными веществами и прежде всего, минеральными веществами, а надземные органы «обслуживают» корни ассимилянтами, необходимым для роста корней. Поэтому можно рассматривать корни – как гетеротрофные образования, использующие для своего функционирования готовые органические продукты, которыми корни снабжают листья. А вот листовой аппарат – пример автотрофного типа питания, использующего минеральные вещества и формирующий из них углеводы, белки и пр (фотосинтез). В соответствие с этим принципом будет складываться и соотношение побег/корень. В течение вегетационного периода соотношение абсолютных скоростей роста побегов и корней схематически представлено на рис. III.5.5 . В начале вегетационного периода более быстро растут корни, осваивая почвенное пространство, в этот момент главное для растения – добыть больше питательных веществ. Но через некоторое время, почти в тот самый момент, когда абсолютная скорость роста достигает максимума, т.е. достигается максимум и в поступлении в побег питательных элементов, начинает интенсивно расти побег. Корни же снижают скорость роста. Для зерновых этот момент приходится на стадии колошения-цветения (для центральной части России – это июль месяц). Далее скорость роста побега увеличивается, достигая максимума, а затем, уже в силу процессов онтогенеза, формирования новых органов, скорость роста побега снижается. Заканчивается вегетационный цикл развития растений.

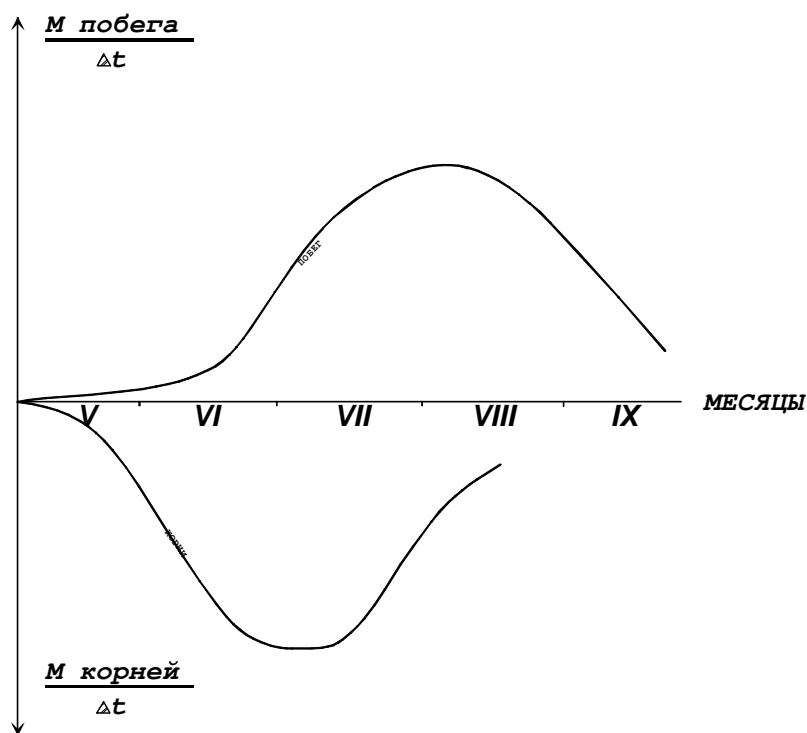


Рис. III.5.5. Динамика абсолютной скорости роста ( $\frac{\Delta M}{\Delta t}$ ) надземной (1) и подземной (2) биомасс.

Однако, далеко не всегда все происходит по указанным кривым. Большое влияние оказывают многочисленные факторы среды. Поэтому для оценки происходящих в растении процессов и используется соотношение побег/корень. Чем теоретически определяется это соотношение? Каков принцип?

Известны 3 гипотезы, объясняющие формирование соотношения побег/корень. Эти гипотезы следующие.

1. Гипотеза конкуренции: рост корней ограничивается продуктами фотосинтеза, а листьев – питательными веществами из корней. Эта гипотеза естественное продолжение того общего принципа «разделения функций», различного типа питания корней (гетеротрофного) и листьев (автотрофного), о котором говорилось выше. Одним из доказательств этой гипотезы и служит указанные на рис III.5.5. закономерности: снижение роста корней от вегетативной к репродуктивной фазе. Значит, если увеличивается соотношение побег/корень, то корни в достатке снабжают листья питательными веществами, в листьях интенсивно идут процессы фотосинтеза, но все образующие ассимилянты расходуются «на месте», в побеге. Растение активно накапливает надземную биомассу, активно функционирует. Если же это соотношение уменьшается, это означает, что побегу не хватает питательных веществ, функционирование фотосинтетического аппарата затруднено, и часть ассимилянтов не используется на месте, а оттекает в корни. Они начинают интенсивно развиваться, осваивать новые участки почвы для потребления большего количества питательных веществ, воды. Соотношение побег/корень снижается. Поэтому нередко используют указанное соотношение как характеристику функционирования растений, условий его произрастания: чем ниже это соотношение, тем хуже обеспеченность растений питательными веществами и водой из почвы.

2. Гипотеза избытка углеводов: рост корней зависит, прежде всего, от избытка углеводов, которые не могут быть использованы листьями. Т.е. корни находятся на «остаточном» снабжении, а основное значение в функционировании растений все же

принадлежит надземной биомассе. Это гипотеза подтверждается фактом усиления роста корней при дефиците азота. Действительно, если из корней поступает мало азота, то при нормально функционирующем фотосинтетическом аппарате большого количества углеводов не образуется, нет их избытка, не возможен рост корней. Уменьшается соотношение побег/корень. Растению надо сократить расходы углеводов для образования их «остатков», которые и будут использоваться корнями для роста.

3. Гипотеза размера емкости: рост корней зависит от размера емкости, использующей углеводы. Это означает, что если «листовая емкость» высока, то корни не будут иметь возможности расти, все углеводы будут уходить в эту «листовую емкость», откладываясь в виде запасов и структурной биомассы. Стоит этой запасной емкости в силу некоторых причин уменьшиться, начинают расти корни, им достаются углеводы для роста и развития.

Как видно, все эти 3 гипотезы взаимно дополняют друг друга. Основная, конечно, первая, а 2-я и 3-я обращают внимание на то, что регулирование соотношения побег/корень осуществляется благодаря, прежде всего, углеводам, образующимся в качестве ассимилянтов в листовой части. Если их формируется много, имеется их избыток, то они поступают в корни; корни растут. И корни тоже могут включиться в регулирование процесса роста. Уменьшение поступления питательных элементов от них приведет к снижению образования запасов и структурной биомассы, оттоку избытка углеводов в корни, к их росту.

Как и все гипотезы и теории, указанная тоже должна обладать предсказательной силой, то есть предсказывать поведение растений в случае тех или иных воздействий. Например, что будет происходить, если мы искусственно подрежем корни. Это можно сделать, протаскивая параллельно поверхности на определенной глубине тонкую прочную проволоку, которая внутри почвы отсечет часть корней. Если при этом почва плодородная, питательных веществ в достатке, листовой части растений достаточно питательных веществ и от оставшихся корней, то подрезка корней будет стимулировать интенсивное накопление углеводов в растении, увеличение его структурной биомассы и запасов. По-видимому, если это сделать на стадии начала роста побега, когда уже сформировалась подземная биомасса (см. рис. III.5.5), это приведет к стимуляции роста побега. И, напротив, на бедных, неудобренных почвах, в периоды водного дефицита, тогда, когда развитие надземной биомассы лимитируется количеством поступающих из корней веществ, порезка корней приведет к стремительному снижению роста надземной биомассы.

Отметим также, что затенение снижает отношение побег/корень, однако в значительно меньшей степени, чем засуха или недостаток питательных элементов. И это вполне понятно: недостаток света приводит к снижению производства продуктов фотосинтеза, они все в меньшей степени оттекают в корень, резко сокращается отток их вниз. В данном случае корни снабжаются по остаточному принципу. А вот в случае недостатка питательных элементов или воды корни, которые доставляются корнями, остаточный принцип для корней невыгоден; надо все же, чтобы корни росли, т.е. «искали» воду и питательные вещества. Конечно, такое «антропоцентристское» объяснение не слишком строго, но позволяет усвоить принципы регулирования роста побегов и корней.

Все указанные экспериментальные факты неоднократно отмечались, что убеждает в правильности приведенных гипотез, основное положение которых можно сформулировать как определение:

<i>Определение</i>
--------------------



Процессы роста надземной и подземной частей растений взаимосвязаны (**коррелятивный рост**): рост корней зависит от количества продуктов фотосинтеза (прежде всего, углеводов), поступающих из листьев, а рост надземной части определяется потоком питательных веществ, влаги, поступающих из корней. Соотношение побег/корень указывает на условия произрастания растений: чем выше это отношение, тем благоприятнее почвенные условия при оптимальных микроклиматологических условиях.

Если рассматривать распределение формирующихся в результате фотосинтеза резервов в виде, прежде всего углеводов, то, как мы знаем, часть их расходуется на дыхание поддержания и дыхание. Основная часть углеводов формирует структурную биомассу (клетчатку). Эта структурная биомасса неодинаково распределяется между надземной и подземной биомассой растений. Схематически в количественном выражении все эти процессы можно представить на следующей схеме (рис. III.5.6):

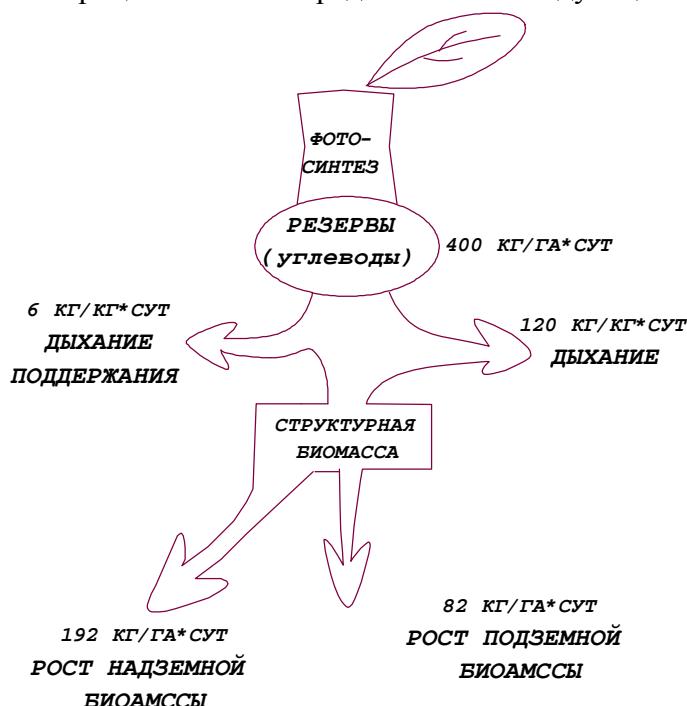


Рис. III.5.6. Схема распределения продуктов фотосинтеза на процессы дыхания и создание структурной биомассы.

Как видно из приведенной схемы, основная часть формирующихся резервов тратится на дыхание, которое связано с ростом (на схеме «Дыхание»). И «Структурная биомасса» в оптимальных условиях внешней среды неодинаково расходуется на рост надземной и подземной биомасс. «Рост подземной биомассы» формирует лишь примерно третью или даже меньшую часть «Структурной биомассы». Но это соотношение, как мы уже знаем, может заметно изменяться в зависимости от факторов внешней среды (обеспеченности влагой, теплом и пр.).

#### Влияние на рост корней внешних условий

- физических свойств почвы;
- температуры
- света
- давления почвенной влаги, аэрации
- удобрений

- рН и токсических элементов
- недостатка иона Са.

Перед рассмотрением указанного ряда влияющих факторов, конечно, следует напомнить, что различные виды растений нередко довольно сильно различаются по реакции на то или иное воздействие. Тем более что селекция приводит к устойчивым видам, в зависимости от токсичности влияющих факторов. Здесь указываются общие моменты таких воздействий на рост и развитие корней растений.

- Влияние физических свойств почвы

В этом отношении показательны опыты Петерсона и Барбера (цит. по Барберу, 1988). В их опытах сравнивался рост корней сои, которая выращивалась в песке и питательном водном растворе. Естественно, в песке циркулировал раствор того же состава. Поэтому на рост корней, на их физиологию оказывал влияние лишь песок. Прежде всего, за счет жесткой непластичной укладки, которая труднопроницаема для корней. В результате опыта оказалось, что, несмотря на то, что общая длина корней в вариантах опыта была близкой, но корни сои в песке имели больший диаметр, чем корни растений, выращиваемых в растворе. В песке диаметр корней составил в среднем 0.49 мм, а в растворе – 0.34 мм. Причем увеличение диаметра корней в песке происходило за разрастание клеток коры корня, их утолщения, они увеличивались в диаметре, но становились короче. Все это указывало на то, что в процессе роста корни в песке испытывают сопротивление. Это именно то сопротивление, которое количественно удастся измерять в виде сопротивления пенетрации (см. Главу I.1). Причем скорость роста экспоненциально убывала при увеличении сопротивления пенетрации. Это удалось показать в оригинальных опытах, когда растения выращивали в сосудах, заполненных маленькими стеклянными шариками. На поверхностные слои стеклянных шариков производили давление, которое передавалось на весь жесткий каркас из стеклянных шариков в сосуде. Это внешнее давление было аналогично сопротивлению пенетрации. В контроле внешнего давления не оказывали, а в опыте его изменяли от 0 до 1 атм. Оказалось, что увеличение внешнего давления на 0.5 атм снижает скорость роста корней в 4 (!) раза, а приближение внешнего давления к 1 атм приводил практически к полному прекращению роста корней, - но в песчаной гомогенной, непластичной и при близкой к насыщенности раствором среде.

Становится совершенно очевидным, что сопротивление пенетрации является основным почвенным фактором, определяющим скорость роста корней. Отметим также, что с уменьшением влажности сопротивление пенетрации, как правило, в большинстве почв увеличивается. Следовательно, и иссушение воздействует на рост корней не только, как снижение тургоресцентности клеток, но и за счет увеличения сопротивления пенетрации среды, в которой растет корень. Эти совместные факторы исследовали в специальных опытах с гомогенной просеянной почвой. В этих опытах с растениями овса также исследовали эффект увеличения сопротивления пенетрации на рост корней. Рост корней практически полностью прекращался при сопротивлении пенетрации около 6-8 атм. Эта величина давления соответствует давлению, развиваемому в кортикальных клетках корня. Поэтому, для того, чтобы корни проникали в почву им необходимо развить давление большее, чем давление, оказываемое в виде сопротивления почвы проникновению. Лишь в этом случае возможен рост корней. И рис. III.5.7 подтверждает это положение. Резкое снижение длины корней наблюдается при величинах сопротивления пенетрации около 3 атм.

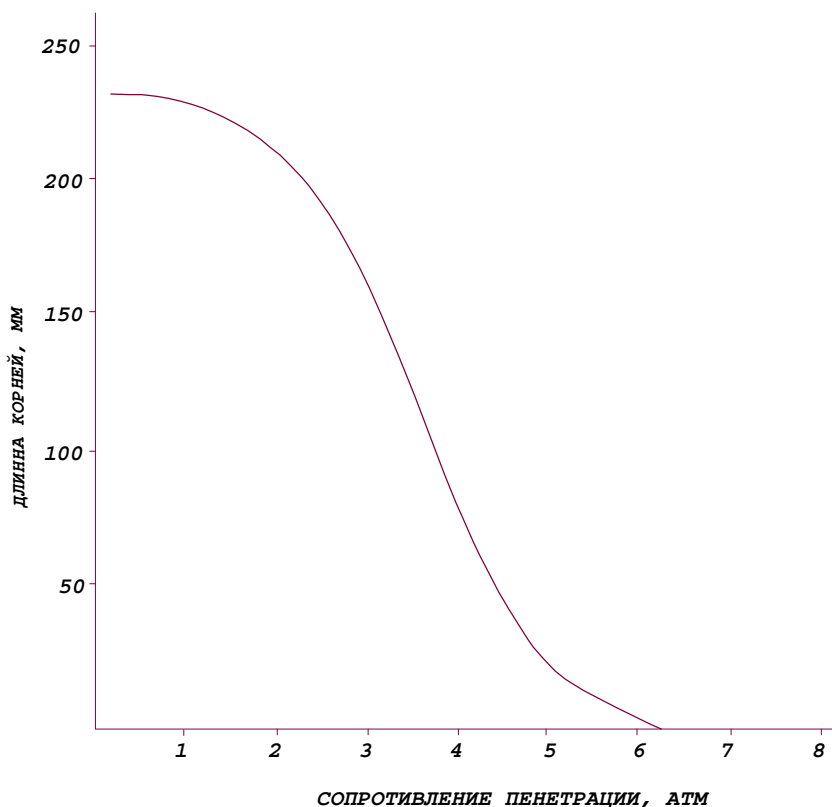


Рис. III.5.7. Влияние сопротивления пенетрации (Р , атм) на длину корней овса (мм). По данным Барлей, Barley, 1962 (цит. по Pearson, 1981)

Кажется парадоксальным, что общепринятой величиной сопротивления пенетрации почвы является значение 3 МПа (что составляет около 30 атм, - см. Главу I.1). То есть почти на порядок выше, чем получается в специальных экспериментах Барлей (1962). Не следует забывать, что реальная почва – это агрегированная система, со множеством межагрегатных трещин, более рыхлых межагрегатных зон, через которое корни могут развиваться более свободно. Поэтому данные Барлей, полученные на гомогенных почвенных смесях, мало отражает количественно природную почвенную ситуацию, когда рост корней практически прекращается лишь при 30 атм, а достигает половины нормальных значений – при 15 атм. Т.е. зависимость проникновения корней от сопротивления реальной почвы близка к линейной. Однако, может заметно изменяться для различных по своим структурно-агрегатным показателям почв.

- Температура почвы

Влияние температуры почвы тоже изучали в специальных опытах, когда надземная часть растений постоянно находилась при 25<sup>0</sup>. А вот сами вегетационные сосуды с почвой и подземной частью растений находились в различных температурных условиях: для различных вариантов опыта температура подземной части варьировала от 12 до 35<sup>0</sup>. В результате опыта оказалось, что максимум отношения побег/корень наблюдается при температуре около 29<sup>0</sup>, а при температурах ниже оптимума это соотношение заметно снижается. То есть при более низких температурах корневая система растет интенсивнее. Что хорошо объясняется приведенной выше гипотезой регулирования соотношения побег/корень: при низких температурах корни доставляют в надземную часть меньшее количество питательных веществ, так как снижается их подвижность и доступность в почве. Это вызывает дополнительный поток образованных, но неизрасходованных ассимилянтов из листьев в корни, что и обуславливает их дополнительный рост. На рис. III.5.8 изменение отношение «побег/корень» как раз и указывает на то, что по мере роста

температур от 15 до 29<sup>0</sup> надземная часть растет все интенсивнее. При температуре 29<sup>0</sup> оно достигает максимума, а при дальнейшем повышении температуры почвы уже сказывается угнетающее действие повышенных температур на корни, что опять-таки должно приводить к оттоку в них ассимилянтов, к их росту и снижению соотношения «побег/корень». На рисунке также хорошо видно, для более адаптированных к холоду растений, указанный максимум соотношения побег/корень смещается в сторону более низких температур.

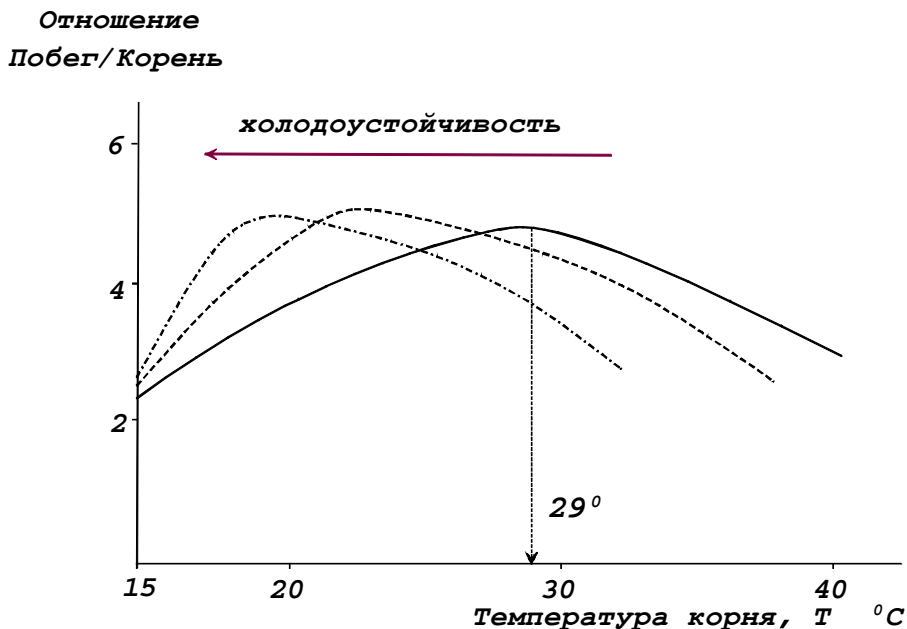


Рис. III.5.8. Зависимость отношения побег/корень от температуры почвы. Пунктирными линиями обозначены более адаптированные к холоду виды (по Барберу).

- Влияние света на рост корней.

Воздействие света весьма просто предсказать, используя гипотезу о регулировании соотношения побег/корень. Действительно, увеличение интенсивности света или длительности светового периода будет увеличивать количество продуктов фотосинтеза. Увеличится и количество ассимилянтов, которые будут иметь возможность оттекать в корни, что должно сказаться на увеличении роста корней. И опыты Троутона (цит. По Барбер, 1988) с частичным затенением посевов действительно показали, что корни очень чувствительно реагируют на количество поступающей световой энергии. В этих опытах при затенении растений рост корней угнетался значительно сильнее, чем рост надземных органов. Так опосредованно, через формирование продуктов фотосинтеза, влияет световая энергия на рост подземной биомассы.

- Влияние давления почвенной влаги

Вполне понятно, что это влияние сложно изучить в почвенных культурах, - будет оказывать первоочередное влияние изменяющегося с изменением давления влаги сопротивления пенетрации. Поэтому экспериментально изучали это влияние в водных культурах, когда добавлением полиэтиленгликоля достигали разного осмотического давления в растворах. Тем самым моделировалось влияние полного давления влаги на рост корней. Область изменения давления влаги – от -0.4 до -8 атм. В результате выращивания растений при этих двух давлениях влаги оказалось, что при уменьшении давления влаги от -0.4 до -8 атм скорость роста побегов уменьшилась в 9.8 раз, а скорость роста корней в 2.2 раза. Тем самым было показано, что скорость роста побегов под влиянием водного стресса снижается быстрее, чем скорость роста корней. Или, иначе

говоря, ухудшение водного питания ведет к снижению соотношения побег/корень. Поэтому, как и указывалось выше, нередко используют снижение показателя побег/корень как свидетельство того, что растение находилось в неудовлетворительных по водному питанию условиях.

- Влияние удобрений

Ранее уже указывалось, что дефицит азота стимулирует рост корней, что также объясняется с точки зрения гипотезы об оттоке избытка ассимилянтов в корни при недостатке питательных элементов, поступающих из корней в листья.

Отметим также, что корни очень активно реагируют и на внесение фосфорных удобрений. Это было доказано на очень элегантном опыте. В вегетационных сосудах выращивались растения. Варианты опыта включали: без внесения фосфора (контроль) внесение фосфора в одном локальном участке почвы, в двух участках, трех и т.д. Т.е. варьировали количество пятен фосфора внутри почвы. А затем учитывали долю корней, которые контактируют с пятнами фосфора в отношении к общей длине корней. Если бы у корней не было «предрасположенности», особого отношения к фосфору, то с увеличением доли фосфора линейно увеличивалась бы и доля корней контактирующих с фосфорными пятнами. А в результате опыта было показано (рис III.5.9), что эта связь нелинейная: доля корней контактирующих с пятнами фосфора растет значительно быстрее простого линейного закона. Т.е, фосфор определенно стимулирует рост корней, в особенности, в случае его локального внесения, когда явно выражен корневой тропизм в отношении зон почвы с увеличенной концентрацией фосфора.

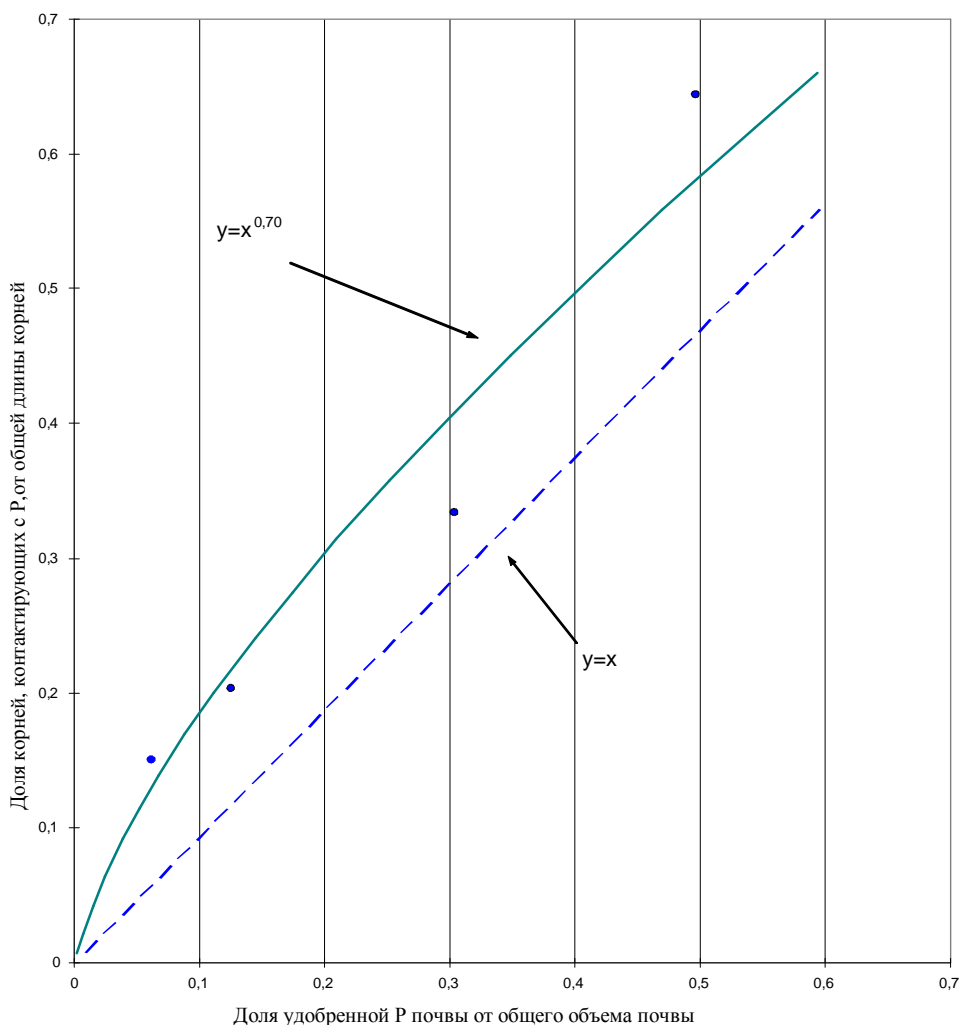


Рис. III.5.9. Влияние локально вносимого фосфора (P) на относительную длину корней: фосфорный тропизм корней.

- Влияние аэрации

Значение аэрации для роста и развития корней вполне понятно из следующих рассуждений. Корень является активной частью растения: корни «дышат», так как корням для активного поглощения веществ необходима энергия. Для дыхания же необходим кислород. Следовательно, содержание кислорода в почвенном воздухе, которое обычно коррелирует с воздухосодержанием, будет существенным образом влиять на рост корней. Экспериментальные исследования показывают, что рост корней существенно замедляется при снижении содержания кислорода в почвенном воздухе менее 15 объемных %. Вспомним, что в атмосферном воздухе, концентрации кислорода и углекислого газа составляют (примерно) 21 и 0.03%. В почвенном же, за счет дыхания корней, за счет химических процессов преобразования карбонатов, содержание  $\text{CO}_2$  увеличивается даже в поверхностных слоях до 1.3%. А более глубоких слоях почвы, из-за физического «стекания» более тяжелого в сравнении с кислородом углекислого газа, его концентрация может значительно повышаться (до 10%). Вполне понятно, что если воздухоносная порозность почвы снижается (например, вследствие затопления, подъема грунтовых вод, верховодки и др.), то и содержание  $\text{CO}_2$  в этом ограниченном объеме воздухоносного порового пространства будет повышаться (корни-то все равно дышат и выделяют  $\text{CO}_2$ ; сумма же содержаний  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  достаточно стабильна и близка к 21%). И при достижении концентрации  $\text{CO}_2$  около 15% корни резко снижают свой рост. Поэтому так важны процессы аэрации в почвенной толще, ликвидация периодов затопления, при которых

снижается заполненное воздухом поровое пространство почвы (снижается воздухосодержание).

Следует отметить лишь, что различные растения по-разному реагируют на недостаток аэрации, на длительность периодов анаэробноза и на повышение концентрации  $\text{CO}_2$ . Некоторые из них (например, рис) имеет специализированные клетки, формирующие ткань, - аэренхиму, сохраняющую воздух и способствующую нормальному росту корней риса в период его затопления.

- Влияние рН и некоторых токсических (для роста корней) элементов рН. Воздействие повышенной кислотности почв может проявляться как прямо, - через повышение  $\text{H}^+$ -ионов в тканях растений, так и косвенно, через увеличения подвижности ионов  $\text{Al}$ . На прямое воздействие указывают нечасто. Наиболее распространена гипотеза о токсичном воздействии рН через увеличение подвижности ионов  $\text{Al}$  и  $\text{Mn}$ . Однако, эксперименты в водных культурах, когда варьировали лишь рН растворов, в которых выращивались растения, также указывают на воздействие ионов водорода на рост растений. Это хорошо видно из рисунка III.5.10, когда в пределах рН ниже 4.0 рост корней заметно замедлялся уже на 1-е сутки, а затем и вообще прекращался. Однако увеличение рН всего на 0.5 единиц и чуть выше уже приводил к заметному росту корней, практически нормализуется.

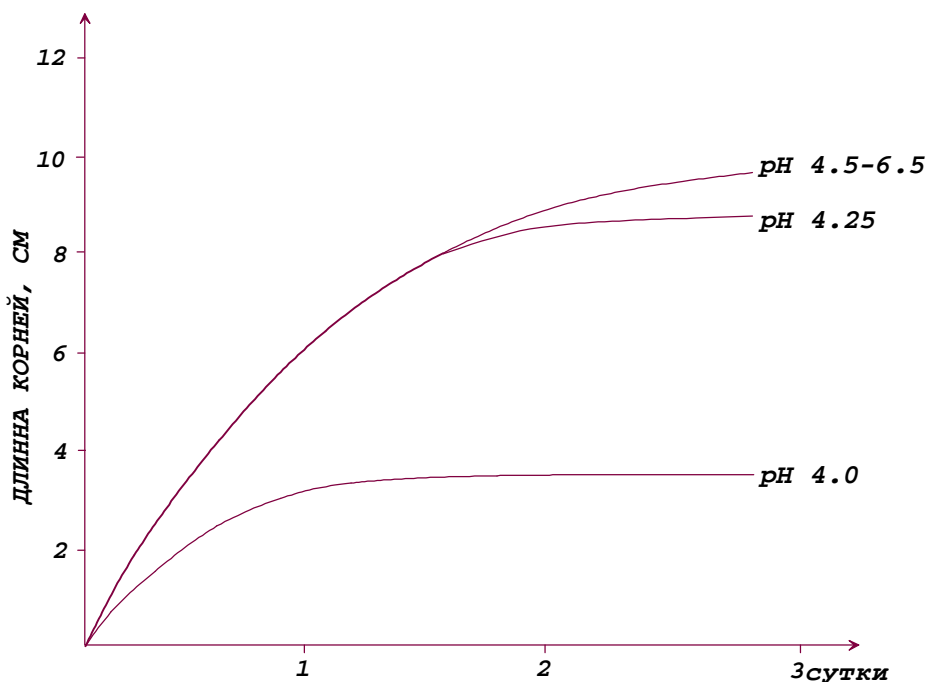


Рис. III.5.10 Динамика роста корней растений, выращенных в водной культуре, при различных рН (по B.W.Pearson, 1981)

Но следует учитывать и то, что изменение рН связано и с токсическим воздействием ионов  $\text{Al}$  и  $\text{Mn}$ , которые появляются при понижении рН.

**Алюминий.** Ионы  $\text{Al}$  появляются в почвенных растворах при довольно кислых условиях, при  $\text{pH} < 5.2$ . Воздействие этих ионов приводит к уменьшению роста корней, потере тургоресцентности, снижению потребления воды и питательных веществ, - симптомам, аналогичным действию почвенной засухи. Да и визуальные характеристики весьма похожи: побурение листьев, завядание листьев.

Действие  $\text{Al}$  связывают с резким уменьшением потребления фосфора. Ионы  $\text{Al}$  способны образовывать сложные плохо растворимые комплексы с  $\text{P}$ . Это снижает

почвенную доступность Р и иммобилизует Р в тканях корней растений. А как отмечено выше, именно Р способствует развитию корней.

Критическая величина, при которой растения достоверно проявляют признаки устойчивого завядания – 2 ммоль/кг почвы. И, что очень важно, токсичность ионов Al проявляется по-разному в зависимости от химического состава (ионной силы) растворов. В минерализованных растворах, при снижении активности иона Al его воздействие также снижается.

**Марганец.** Ионы Mn еще более токсичны, чем Al. Однако условия появления ионов Mn в растворе редко встречаются в почвах: необходимы низкие значения pH и восстановительные условия. Такие условия могут наблюдаться в некоторые периоды в гидроморфных почвах, в которых негативное действие на рост корней может оказывать и недостаток кислорода в почвенном воздухе, и ионы Al, и многие другие проявляющие в таких почвах токсичные элементы. Собственно же максимальная концентрация или критический уровень иона Mn составляет 10 ppm.

**Недостаток Са.** В случае промывных условий, при низких pH, или в некоторых специфических условиях засоления в почве может наблюдаться недостаток такого макроэлемента, как Са. Его отсутствие проявляется не само по себе, а лишь в отношении к сумме присутствующих в почвенном растворе катионов. На рис. III.5.11 представлена зависимость относительной длины корней от соотношения Са к сумме катионов. Если это отношение очень мало, то корни оказываются чувствительными к недостатку иона Са в растворе, резко замедляют свой рост. Однако при достижении величины этого соотношения более 0.2 рост корней восстанавливается, достигая оптимального. Величины указанного отношения <0.2 могут встречаться весьма редко: для этого нужны довольно минерализованные при низком содержании в них иона Са растворы, которые в почвах встречаются чрезвычайно редко.

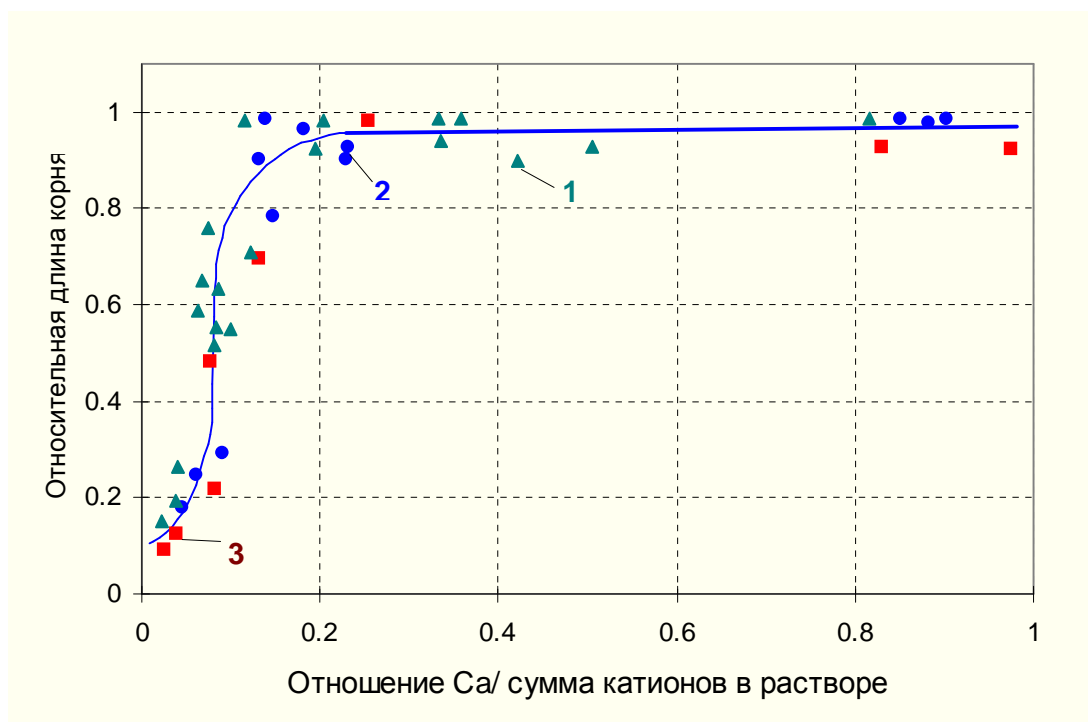


Рис. III.5.11. Зависимость относительной длины корня от соотношения содержаний Са к сумме катионов в почвенном растворе ( $\text{Ca}/\Sigma \text{ катионов}$ ). (По B.W.Pearson, 1981)



### **Биологический блок в модели продуктивности**

Итак, взаимосвязь основных физиологических процессов в растении можно представить следующим образом. Водный обмен растений регулируется таким основным показателем потока влаги в растении, как транспирация. Высокая, близкая к потенциальной транспирации растений – это открытые устьица растений, через которые свободно и быстро диффундирует углекислый газ в межклеточники. А затем и в клетки растений, к пластидам, где и осуществляется фотосинтез, включающий световую и темновую фазы. Итог процесса фотосинтеза – образование ассимилянтов (углеводов), которые идут на формирование запасов и на дыхание. Последнее дает энергию для процессов активного транспорта минеральных веществ из почвы во все части растения. Запасы ассимилянтов (резервы) расходуются также на образование структурной биомассы за счет процесса роста. Все эти процессы приведены на рис. III.5.12, где в виде потоковой диаграммы представлены эти основные процессы в растении.

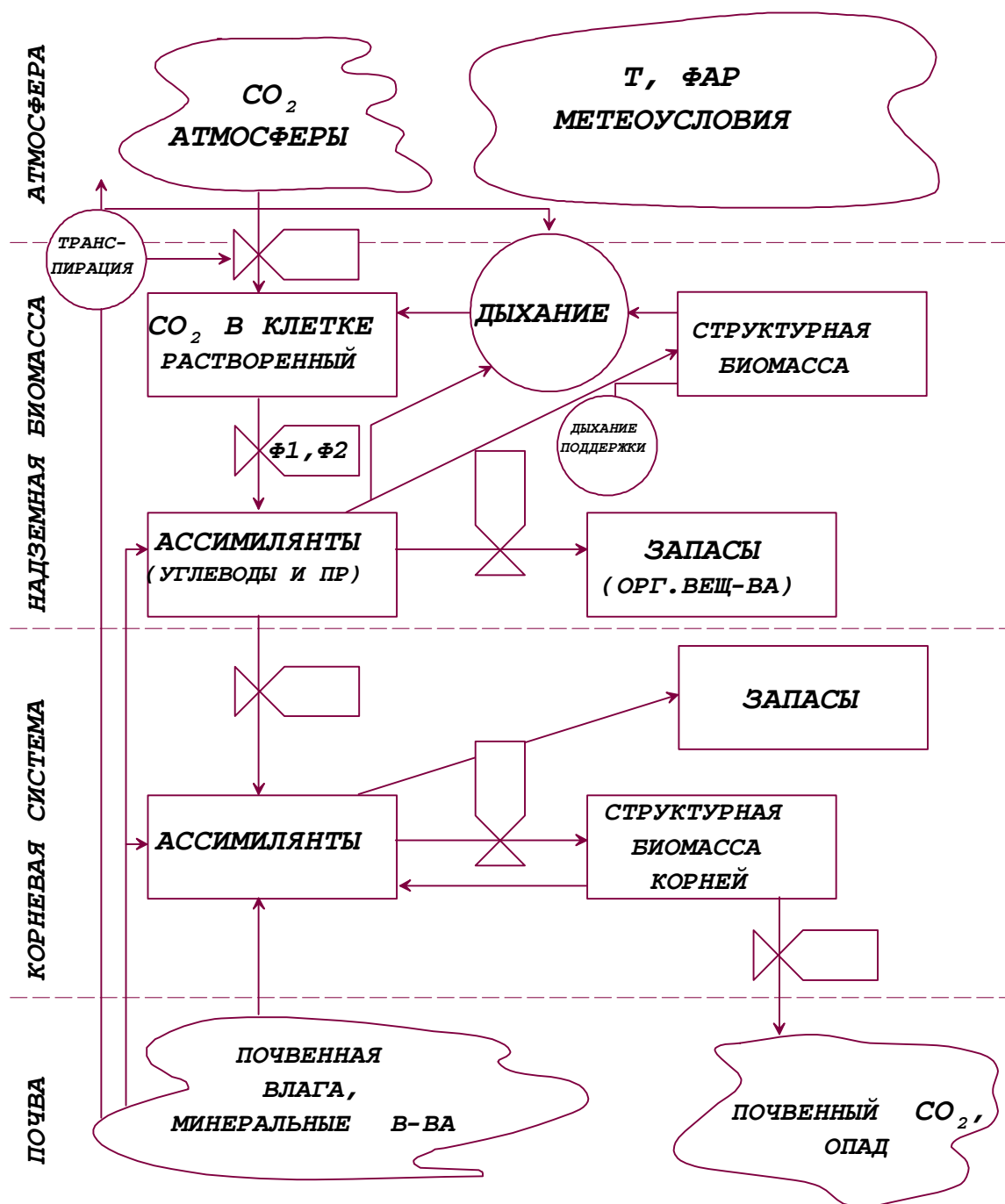


Рис. III.5.12. Поток-диаграмма формирования продуктивности при безлимитном поступлении минеральных биофильных веществ.

Как видно из приведенной схемы, транспирация, фотосинтез и дыхание растений будут определять биомассу. Транспирация может в этом случае являться обобщенным показателем, так как она связана простым соотношением с приростом биомассы,  $\frac{\Delta M}{\Delta t}$ , через транспирационный коэффициент – количество воды, необходимое для создания одного грамма веществ,  $K_{Tp}$ :

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{Tp}{K_{Tp}}$$

где  $Tr$  – транспирация растений,  $K_{Tr}$  – транспирационный коэффициент. А вот  $K_{Tr}$  является коэффициентом, в полной мере аккумулирующим в себе влияние многочисленных параметров среды, таких как интенсивность лучистой энергии, температура, степень влагообеспеченности, а также и физиологических особенностей растений – сорт, период онтогенеза и др. Таким образом, получается, что транспирация растений оказывается одним из основных регулирующих факторов (наряду с ФАР, температурой, газообменом), который можно использовать при анализе продуктивности агроценозов. Факт весьма примечательный: ведь транспирация – это процесс, служащий, прежде всего для предохранения растений от перегрева, основа терморегуляции растений. А вследствие взаимосвязей, схематически представленных на рис. III.5.12, оказывается одним из основных управляющих процессов при моделировании процесса продуктивности растений, создания структурной биомассы.

Критерий влагообеспеченности мы знаем – это относительная транспирация,  $Tr/Tr_0$ . Потенциальная транспирация зависит прежде всего от метеорологических факторов, и легко может быть заменена, например, потенциальным испарением или испарением с открытой водной поверхности, которое зависит прежде всего от притока тепла к испаряющей поверхности,  $E_0$ . Одним из удачных следует признать уравнение, предложенное ДеВитом (цит. По Хэнкс и Ашкрофт, 1985), связывающее массу сухого надземного веществ ( $M_c$ ) с транспирацией ( $Tr$ ) и потенциальным испарением ( $E_0$ ) через некоторый коэффициент ( $f$ ), характеризующий прирост сухого вещества:

$$M_c = f \frac{Tr}{E_0}, \text{ где } f - \text{коэффициент прироста сухого вещества, [кг/(га сут)]}. \text{ Этот}$$

коэффициент варьирует от 207 кг/(га сут) для сорго, до 115 и 55 кг/(га сут) для люцерны и пшеницы. Следует подчеркнуть, что данный подход к программированию урожая с использованием приведенного уравнения не может быть использован для оценки продуктивности отдельных частей растений и прогноза специфической продукции в виде генеративных органов (плоды, зерна и пр.). Не может быть использовано это уравнение и для условий переувлажнения, когда избыточная влага действует пагубно на рост растений. Действительно, если иметь в виду биологическую кривую урожая от количества влаги, поступившей на поле (см рис... Главы III.2), то избыток влаги снижает продуктивность растений: урожай уменьшается, и кривая плавно снижается. Поэтому указанное уравнение применимо лишь к восходящей ветви биологической кривой урожая, для диапазонов действующих факторов, близки к оптимальным. А распределение биомассы между органами в процессе онтогенеза можно задать в виде специфической функции, типа  $M_i = k_i M$ , где  $M$  – общая биомасса,  $M_i$  – биомасса отдельных органов (например, листьев, корней), а  $k_i$  – это коэффициент, зависящий от вида растения, сорта, и также от физических условий среды, прежде всего от суммы температур. Характер наступления фаз развития мы уже рассматривали в данной части (Глава III.1, рис. III.1.8).

Однако рассмотренные процессы происходили при полной обеспеченности растений минеральными веществами. В других условиях, недостаток азота или фосфора может являться управляющим фактором развития всего растения. Уже указывалось, что существует функциональный баланс между ростом побегов и корней. Этот баланс зависит от потоков «вниз» и «вверх» – поставки листьями углеводов и доставки корнями из почвы воды и питательных веществ. И функциональность этого баланса проявляется в том, что регулируется соотношение побеги/корни. В большинстве случаев это отношение регулируется количеством азота: чем выше количество поступающего азота, тем больше растут побеги. Хотя для некоторых растений аналогичной может быть и роль фосфора, Например, для бобовых. Так или иначе, азотный (а при необходимости, и фосфорный) блок должен быть включен в общую модель формирования биопроductивности растений. Азот в виде неорганических соединений поступает из почвы, где его содержание

определяется процессами минерализации из органических азотосодержащих веществ и иммобилизации в виде формирования микробной биомассы, а также непосредственно из минеральных удобрений. Далее азот участвует в процессе создания биомассы. Здесь также наблюдается равновесие между азотом в стабильной и мобильной формах. Стабильная форма представлена в основном в виде белкового азота. Мобильная - это азот, который может поступать из старых тканей растений и представлять определенный «буфер» для функционирования растений. В результате, за счет стареющих тканей могут расти новые, что обеспечивает жизнедеятельность растений и при недостатке поступления азота из почвы. Таким образом, основным управляющим фактором в данном случае является поток неорганического азота из почвы, действие которого может быть «сглажено» за счет перераспределения азота между стареющими тканями, поставляющими азот, и новыми растущими, формирующими стабильный белок.

Аналогичную картину можно представить и для фосфора, у которого также наряду с поступлением из почвы имеются внутренние резервы в растении в виде распределения фосфора между старыми и растущими тканями.

Таким образом, общая схема продукционного процесса будет включать в качестве основного водный блок, который напрямую, за счет коэффициента водопотребления связан с формированием структурной биомассы. Управляющими факторами в этом случае служат доступность почвенной влаги, ФАР и метеоусловия. Управляющими факторами могут служить также доступность почвенного азота и фосфора, которая может компенсироваться перераспределением этих минеральных веществ между старыми и новыми тканями.

#### Литература

1. Б а р б е р С. А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. Пер. с англ. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
2. С а б и н и н Д. А. Физиология развития растений. М., Изд-во АН СССР. 1963.
3. Т о о м и н г Х. Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Л.: Гидрометеоздат. 1984.

## Справочные материалы

Таблица 1 Приложения

Оценка структуры и сложения пахотного слоя почв (по И.В. Кузнецовой, 1979).

Содержание водопрочных агрегатов размером более 0,25 мм, %	Оценка		Равновесная плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	Оценка плотности сложения
	Водопрочности структуры	Устойчивости сложения по структуре		
Менее 10	Неводопрочная	Неустойчивое	Более 1,5	Очень плотное
10...20	Неудовлетворительная		1,5...1,4	
20...30	Недостаточно удовлетворительная	Недостаточно устойчивое	1,4...1,3	Плотное
30...40	Удовлетворительная	Устойчивое	1,3...1,2	Уплотненное
40...60	Хорошая		1,2...1,1	Оптимальное для большинства культур
60...75(80)	Отличная	Высокоустойчивое	1,1...1,0	
Более 75(80)	Избыточно высокая		Менее 1,0	Рыхлое (пашня вспушена)

Таблица 2 Приложения

Оценка плотности и пористости суглинистых и глинистых почв в вегетационный период (по Н.А. Качинскому, 1965).

Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>	Общая пористость почвы, %	Оценка плотности	Оценка пористости
Менее 1,0	Более 70	Почва вспушена или богата органическим веществом	Избыточно пористая – почва вспушена
1,0...1,1	65...55	Типичные величины для культурной или свежеспаханной почвы	Отличная – культурный пахотный слой
1,1...1,2	55...50	Пашня слабо уплотнена	Хорошая, характерная для окультуренных почв
1,2...1,3	50...45	Пашня уплотнена	Удовлетворительная, характерная для освоенных почв
1,3...1,4	45...40	Пашня сильно уплотнена	Неудовлетворительная для пахотного слоя
1,4...1,6	40...35	Типичные величины для подпахотных горизонтов (кроме черноземов)	Чрезмерно низкая – характерна для уплотненных подпахотных и иллювиальных горизонтов
1,6...1,8		Сильно уплотненные иллювиальные горизонты	

Таблица 3 Приложения

Примерная оценка гранулометрического состава почв для зерновых культур (по Н.А. Качинскому, 1965).

Почвы	Оценка по гранулометрическому составу почв, баллы						
	Глинистые	Тяжелосуглинистые	Среднесуглинистые	Легкосуглинистые	Супесчаные	Песчаные мелкозернистые, связные	Песчаные крупнозернистые, рыхлые
Глееподзолистые	4	6	8	10	8	5	3
Подзолистые	5	6	8	10	8	5	3
Дерново-подзолистые	6	7	10	8	6	4	2
Серые лесные	8	10	9	7	6	4	2
Черноземы типичные	10	9	8	6	4	3	1
Черноземы южные	9	10	8	7	5	3	1

Темно-каштановые	8	10	9	7	6	3	1
Каштановые	7	9	10	8	6	3	1
Бурые	7	8	10	7	5	2	1
Сероземы	8	10	9	7	5	3	2
Красноземы и желтоземы	10	9	7	6	4	—	—
Желтоземно-подзолистые	8	9	10	9	6	4	2

Таблица 4 Приложения

**Критические давления, оказываемые на почвы при проходе техники при различной влажности и времени года (по А.Г.Бондареву, 1990).\***

Время года	Влажность почвы	Критическое давление, кПа
Весна	> НВ	<80
Осень и лето	> НВ	<100
Весна	НВ - 0.5 НВ	80-180
Осень и лето	НВ - 0.5 НВ	100-210
Весна	<0.5 НВ	<180
Осень и лето	<0.5 НВ	210

\* - колесный трактор оказывает контактное давление около 100 кПа, а К-700 (701) «Кировец» – до 190–220 кПа.

Таблица 5 Приложения

**Оценка наименьшей влагоемкости почв (по Н.А. Качинскому, 1965 ).**

Влагоемкость, % сухой массы почвы	Оценка
Тяжелые почвы	
40...50	Наилучшая
30...40	Хорошая
25...30	Удовлетворительная
Менее 25	Неудовлетворительная
Легкие почвы	
20...25	Отличная для песчаных почв
10...25	Удовлетворительная для полевых культур
3...10	Удовлетворительная для лесных культур
Менее 3	Неудовлетворительная для любых культур

Таблица 6 Приложения

**Некоторые критические уровни физических свойств почв (для Почвенной службы Австралии)**

Почвенный показатель	Критический уровень
Глубина почвенного профиля	>50 см
Сопротивление пенетрации	<0.5 МПа
Содержание макропор (диаметр >30 мкм), макропористость	> 15% к объему почвы
Сохраняющие поры (диаметр от 0.2 до 30 мкм)	> 20%
Коэффициент влагопроводности (при -1000 см водн.ст.)	>10 <sup>-2</sup> см/сут
Воздухоносная порозность (после 24 часов свободного дренажа)	>15%
Температурный оптимум –	18-25° С.

Таблица 7 Приложения

**Оценка переуплотнения почвы по критическим значениям сопротивления пенетрации (по Lhotský J., a kol, 1984; Zrubec F., 1998\*\*).**

Сопротивление пенетрации (МПа) * Для диапазона влажности (% к весу)	Критические значения сопротивления пенетрации для соответствующих классов по гранулометрическому составу					
	Глина	Тяжелый суглинок	Средний суглинок	Легкий Суглинок	Супесь	Песок
	2.8 – 3.2 28 – 24	3.2 – 3.7 24 – 20	3.7 – 4.2 18 – 16	4.5 – 5.0 15 – 13	5.5 12	6.0 10

\* Если реальная влажность почвы выше приведенной в диапазоне, к измеренному значению сопротивления пенетрации следует прибавить 0.25 МПа, а если ниже - вычесть 0.25 МПа.

\*\* L h o t s k ý J., a kol.: Metodika zúrodnění zhutněných půd . ÚVTIZ Praha, 1984; Z r u b e c F. Metodika zúrodnenia zhutnených pôd. SFRI, Bratislava. 1998.

Таблица 8 Приложения

**Некоторые характерные физические свойства почв различного гранулометрического состава (наиболее вероятный диапазон – в скобках)\***

Класс по гранулометрическому составу	Порозность (% объемный)	Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>	НВ (% к весу)	ВРК (% к весу)**	ВЗ(% к весу)	ДДВ(% к весу)	Коэффициент фильтрации, см/сут
Песок рыхлый***	37 (32–40)	1.65 (1.5–1.75)	4 (3–5.5)	3.5 (2.5–5.5)	2.5 (2–3.5)	2 (1.5–3.5)	> 150
Песок связный***	38 (32–42)	1.6 (1.5–1.7)	6 (5–10)	4.5 (4–6)	4 (3–6)	4 (2–6)	150 (80–200)
Супесь	43 (40–46)	1.5 (1.4–1.6)	14 (10–18)	7.5 (6–8.5)	6 (4–8)	8 (6–10)	100 (50–150)
Легкий суглинок	47 (43–51)	1.4 (1.3–1.5)	22 (18–26)	13 (12–14.5)	10 (8–12)	12 (10–14)	80 (40–120)
Средний суглинок	49 (47–51)	1.35 (1.3–1.4)	27 (23–31)	18.5 (17–19.5)	13 (11–15)	14 (12–16)	50 (30–70)
Тяжелый суглинок	51 (49–53)	1.3 (1.25–1.45)	30 (27–35)	21 (20–22)	15 (13–17)	16 (14–18)	40 (20–70)
Глина	53 (51–55)	1.25 (1.2–1.4)	35 (31–39)	25.5 (24–27)	20 (18–24)	15 (14–18)	15 (2–30)

\* В данной таблице приведены ориентировочные значения физических свойств. В реальных условиях, при непосредственных определениях эти усредненные значения и пределы варьирования могут значительно отличаться в связи с содержанием органического вещества, оструктуренностью, сельскохозяйственной обработкой, растительностью и многими другими факторами, существенно изменяющими приведенные ориентировочные значения.

\*\* ВРК определены по характерным основным гидрофизическим характеристикам (ОГХ) на основании метода А.Д.Воронина

\*\*\* Природные пески почти всегда слоисты. Вследствие этого приведенные данные весьма ориентировочны

Таблица 9 Приложения

**Термические характеристики климата отдельных форм рельефа** (по Д.И.Шашко, 1967)  
 (за нулевой уровень приняты термоусловия на выровненных элементах рельефа: равнинах, плоских вершинах, в средних частях пологих склонов).

Форма рельефа	Поступление холодного воздуха		Разность по сравнению с выровненными условиями			
	приток	отток	Минимал ных ночных температ ур весной и осенью, °С	Длительно сти безморозн ого периода, дни	Суммы температ ур за безмороз ный период, °С	Минима льной температ ура воздуха в июле, °С
Вершины, верхние и средние части склонов	Нет	Есть	+3...+5	+15...+25	+150... ...+200	+1,5... ...+2,0
Дно и нижние части склонов узких долин	Есть	Есть	+3...+5	+15...+25	+150... ...+200	+1,0... ...+2,0
Долины больших рек, берега водоемов	Есть	Есть	+2...+4	+10...+20	+100... ...+200	+0,5... ...+1,0
Дно и нижние части склонов нешироких, извилистых, замкнутых долин	Есть	Почти нет	-4...-6	-15...-25	-200... ...-300	-0,5... ...-2,0
Котловины	Есть	Нет	-2...-3	-20...-30	-250... ...-350	-2,0... ...-2,5
Нижние части склонов и прилегающие части дна широких долин	Есть	Слабый	-3...-5	-15...-25	-200... ...-300	-1,0... ...-1,5
Замкнутые, широкие, плоские низины	Есть	Почти нет	-4...-6	-20...-30	-250... ...-300	-2,0... ...-2,5
Выровненные пониженные участки с неосушенными торфяными почвами	Нет	Нет		-10...-15	-100... ...-200	-1,0... ...-1,5
Выровненные участки с осушенными почвами (луга)	Нет	Нет		-25...-30	-250... ...-300	-



Таблица 10 Приложения

Система оценки агроклиматических условий				
Показатели	Термические	Влагообеспеченности	Ветровой режим	Перезимовка
Средние	<ul style="list-style-type: none"> <li>– среднегодовая температура;</li> <li>– среднемесячные температуры самого холодного и самого теплого месяцев;</li> <li>– среднемесячные минимальная и максимальная температуры самого холодного и самого теплого месяцев;</li> <li>– среднемесячные относительная влажность и температура воздуха;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– среднегодовое количество осадков;</li> <li>– среднемесячные количества осадков</li> </ul>	Скорость ветра в году и в отдельные периоды вегетации	средняя высота снежного покрова;
Абсолютные	<ul style="list-style-type: none"> <li>– минимум и максимум температуры;</li> <li>– критические (лимитные) температуры всходов и созревания;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– запасы продуктивной влаги в слое почвы 0...20 см осенью перед началом сева озимых и в слое 0...100 см весной;</li> <li>– относительная влажность воздуха в 13 часов;</li> <li>– дефицит влажности воздуха;</li> <li>– испаряемость</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>– влажность почвы перед промерзанием и установлением устойчивого снежного покрова;</li> <li>– губительная температура</li> </ul>
Суммы	<ul style="list-style-type: none"> <li>– температур выше 15, 10 и 5 °С за вегетацию</li> <li>– среднесуточных температур почвы выше 10 °С на глубине 5 и 10 см;</li> <li>– биологических температур</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сумма осадков за год;</li> <li>– сумма осадков за вегетацию</li> <li>– суммы осадков за зиму, весну, лето, осень;</li> <li>– дефицитов влажности воздуха</li> </ul>		температур ниже 0°С (суровость зимы);
Длительность	<ul style="list-style-type: none"> <li>– длительность периодов со среднесуточными температурами выше 5, 10 и 15 °С;</li> <li>– длительность безморозного периода;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– число дней с относительной влажностью воздуха &gt;80% и &lt;30%;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– число дней в году со скоростью ветра выше 5 м/с;</li> <li>– число дней в году с суховеями</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– число дней в году с оттепелями;</li> <li>– продолжительность оттепелей;</li> </ul>
Даты	<ul style="list-style-type: none"> <li>– даты прохождения среднесуточных температур через 0, 5, 10 и 15 °С весной и осенью;</li> <li>– даты первого осеннего и последнего весеннего заморозков (среднемесячные и экстремальные – самые ранние осенние, самые поздние весенние)</li> </ul>			даты установления и схода снежного покрова
Вероятность		<ul style="list-style-type: none"> <li>– обеспеченность (суммарная вероятность) осадками;</li> <li>– выпадения ливней и сильных дождей в отдельные периоды;</li> <li>– вероятность проявления засух в отдельные периоды вегетации</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вероятность скоростей ветра выше 5 м/с в отдельные периоды вегетации;</li> <li>– вероятность суховеев в отдельные периоды</li> </ul>	вероятность наступления оттепелей

