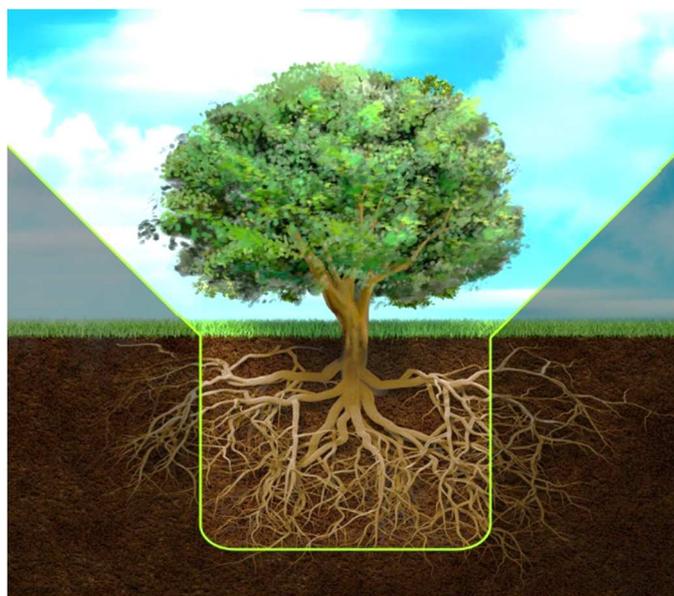


**Владимирский государственный университет
Верхневолжский федеральный аграрный научный центр**

**А. А. КОРЧАГИН И. М. МАЗИРОВ
И. М. ЩУКИН**

АГРОФИЗИКА И РЕОЛОГИЯ ПОЧВ

Учебное пособие



Владимир 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Верхневолжский федеральный аграрный научный центр»

А. А. КОРЧАГИН И. М. МАЗИРОВ И. М. ЩУКИН

АГРОФИЗИКА И РЕОЛОГИЯ ПОЧВ

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2022

ISBN 978-5-9984-1466-4

© Корчагин А. А.,
Мазиров И. М., Щукин И. М., 2022

УДК 631.41
ББК 40.32

Рецензенты:

Кандидат химических наук
ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией проблем внедрения
адаптивно-ландшафтных систем земледелия
Верхневолжского федерального аграрного научного центра
И. Ю. Винокуров

Кандидат биологических наук
доцент кафедры биологии и экологии
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Е. Ю. Кулагина

Корчагин, А. А. Агрофизика и реология почв [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. А. Корчагин, И. М. Мазиров, И. М. Щукин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых ; Верхневолж. федер. аграр. науч. центр. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2022. – 199 с. – ISBN 978-5-9984-1466-4. – Электрон. дан. (3,16 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Содержит теоретический материал по курсу «Агрофизика и реология почв», а также контрольные вопросы и задания.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 06.03.02 – Почвоведение и 35.03.03 – Агрохимия и агропочвоведение. Может быть полезно преподавателям и учащимся старших классов лицеев, колледжей и общеобразовательных школ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 12. Ил. 54. Библиогр.: 36 назв.

ISBN 978-5-9984-1466-4

© Корчагин А. А.,
Мазиров И. М., Щукин И. М., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
-----------------------	---

Раздел 1. АГРОФИЗИКА

Глава 1. ФИЗИКА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ (МИКРОКЛИМАТОЛОГИЯ)	8
1.1. Радиационный и тепловой режимы	8
1.2. Основные агрометеорологические характеристики.....	22
1.3. Температура почвы и её значение для растений	44
Глава 2. АГРОФИЗИКА ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА В РАСТЕНИЯХ	59
2.1. Фотосинтез и дыхание растений	59
2.2. Растение и вода.....	83
Глава 3. ФИЗИКА МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ	111
Глава 4. РАСТЕНИЯ И СВЕТ	120
Глава 5. РОСТ, РАЗВИТИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ...	132

Раздел 2. РЕОЛОГИЯ ПОЧВ

Глава 1. ТИПЫ СВЯЗЕЙ И СТРУКТУР МЕЖЧАСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.....	165
Глава 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	168
Глава 3. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ДЛЯ ИДЕАЛЬНЫХ СИСТЕМ	171
Глава 4. ОСНОВНЫЕ РЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ К ПОЧВЕ	174
Глава 5. ПРЕДЕЛЫ АТТЕРБЕРГА	178
Глава 6. ТИКСОТРОПИЯ. РЕОПЕКСИЯ. ПЛЫВУННОСТЬ. ДИЛАТАНСИЯ	179
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	187
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	188
ПРИЛОЖЕНИЯ	191

ВВЕДЕНИЕ

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.

Основные законы продукционного процесса

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 сами видоизменять, трансформировать 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 посевах 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. Этим законам немного, некоторые из них совершенно очевидны и понятны на быденном уровне. Другие требуют более подробного рассмотрения. 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. 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 части 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: 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: 1) рост интенсивности процесса будет определяться скоростью прироста фактора, наиболее удаленного от оптимума и 2) следует учитывать «компенсирующее» действие других, находящихся не в оптимальных условиях, факторов.

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.

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 фазы 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, их приложение к разнообразным ситуациям вполне возможно. 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.

Реология – наука о течении и деформациях материальных тел. Заметим, именно всех материальных тел, не только жидкостей. В ко-

нечном счете, даже кристаллические породы, такие как базальт, гранит и проч., под действием механических воздействий тоже изменяют свою форму, «текут». Ко всем природным телам применимы основные понятия и законы реологии. В том числе и к почве – сухой, влажной, насыщенной водой, в любом ее состоянии. Течение дисперсного почвенного тела, конечно же, будет иметь свои особенности, связанные прежде всего с тем, что при деформировании почвы почвенные частицы (элементарные почвенные частицы (ЭПЧ), микроагрегаты, агрегаты) будут взаимодействовать, тереться друг о друга. Поэтому большое значение будут иметь форма и наличие влаги вокруг частиц, которая может играть роль определенной «смазки». Кроме того, на взаимоположение почвенных частиц основное влияние будут оказывать связи между этими частицами.

Таким образом, дисциплина агрофизика и реология почв дает представление о физических, физико-химических и биофизических процессах в системе «почва – растение – деятельный слой атмосферы», показывает основные закономерности продукционного процесса, разрабатывает 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. Реология почв как один из разделов механики показывает особенности течения почвенных тел, типы связей и структур межчастичного взаимодействия, виды деформации почв, реологические законы для идеальных почвенных систем, дает основные реологические модели, применяемые к почве. Раскрывает понятия тиксотропии, реопексии, псевдопластичности и дилатансии, имеющих огромное значение в окружающих нас ландшафтах и нередко приводящие к катастрофическим последствиям.

Раздел 1. АГРОФИЗИКА

Глава 1. ФИЗИКА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ (КЛИМАТОЛОГИЯ)

1.1. Радиационный и тепловой режимы

Поток лучистой энергии – это количество лучистой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади. Единицы измерения – Вт/м², кал/см² мин, Дж/см² 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*. 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/м². Суммарная радиация в этой же зоне может достигать 1500 Вт/м², среднедекадные величины колеблются от 250 до 1000 Вт/м².

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:

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

где S_{λ} – коэффициент рассеивания, m – коэффициент преломления в газе, n – число молекул в единице объема, λ – 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_{Σ} .

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_{ii} , 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: $\Psi = \delta K^4$, где Ψ – эмиссии абсолютно черного тела, а K – температура по Кельвину (т.е. $T+273.16$), а δ – константа Стефана-Больмана ($5.67 \cdot 10^{-8}$, ватт/м² К⁻⁴). 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, ε : $\Psi = \varepsilon \delta K^4$. 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 $(I_s + I_a)_{\text{поступ.}}$ и длинноволновая составляющие вполне сравнимы по величинам.

Часть поступающей радиации отражается от деятельной поверхности в виде коротковолновой $(I_s + I_a)_{\text{отраж.}}$, 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:

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

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» (α , величина безразмерная) как отношение отраженной к поступившей коротковолновой энергии, характеризующее состояние деятельной поверхности:

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

Так, для свежего снега α составляет 0,8–0,85, для сухой почвы – 0,15–0,35, а для влажной – 0,05–0,014. Естественно, чем ниже α , тем

большее количество радиационной энергии преобразуется и поступает в почву. Так что, если мы хотим направить в почву дополнительный поток энергии, надо стремиться уменьшить α 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: $\alpha = \zeta^{(c \cdot \sin \beta + 1)}$, где ζ – 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, β – угол падения солнечных лучей.

В случае использования величины α , уравнение радиационного баланса выглядит так:

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

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_{Σ} .

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 $(I_s+I_a)_{отраж.}$ 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. 1.

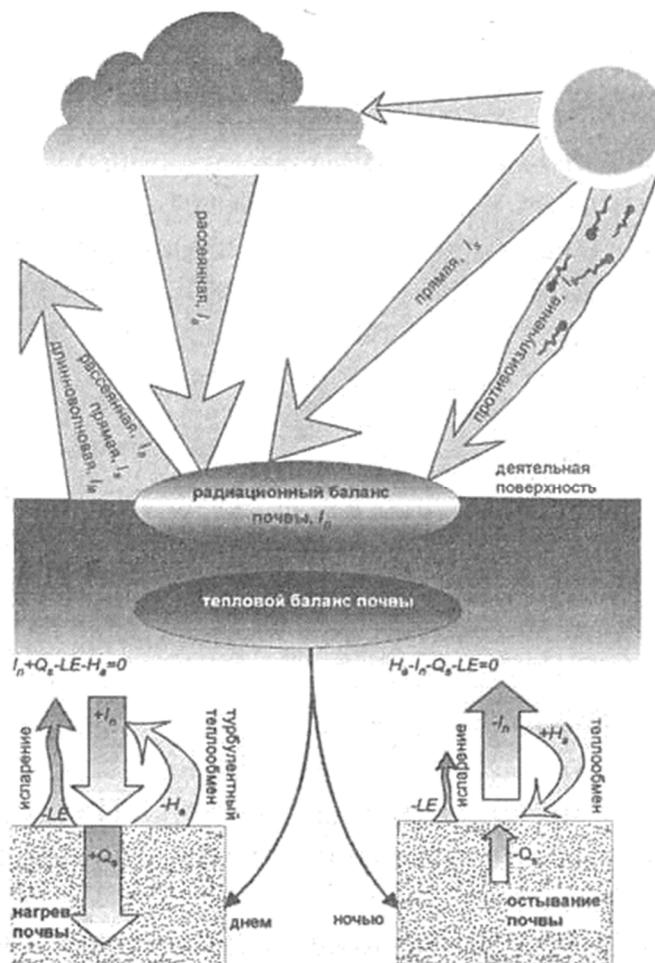


Рис. 1. Схема радиационного и теплового баланса деятельной поверхности

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) + (Противоизлучение 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 – H_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 $H_2O/см^2 \cdot сут$). Поэтому размерности всех составляющих теплового баланса те же, что и радиационного баланса – кал/см²·сут. Не забудем и еще одну составляющую – энергия, пошедшая на фотосинтетические процессы – $Q_{ФАР}$, 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.

$$I_n - Q_s - H_a - LE - Q_{ФАР} = 0$$

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. 2, составляющие имеют другое направление. Из глубины почвы к поверхности направлен внутрипочвенный поток. И величина Q_s положительна, так же, как и H_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:

$$G_s + H_a - I_n - LE = 0$$

Это означает, что и радиационный баланс в ночное время отрицателен. Поэтому дважды в сутки основные составляющие теплового баланса (I_n , Q_s , H_a) меняют свой знак и проходят через ноль. Тепловой баланс имеет периодический (но не симметричный) вид, как это и изображено на рис. 2. Суточный ход радиации суммарной радиации рассчитывают на основании высоты Солнца (h_{\square}), и некоторых коэффициентов по уравнению Берлянд:

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

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. 2, а) суточный радиационный баланс положителен большую часть суток, а вот зимой (рис. 2, б) – в основном отрицателен. Это хорошо видно на рис. 2: зимой более длительный период отрицательных значений I_n , Q_s . В результате почва остывает.

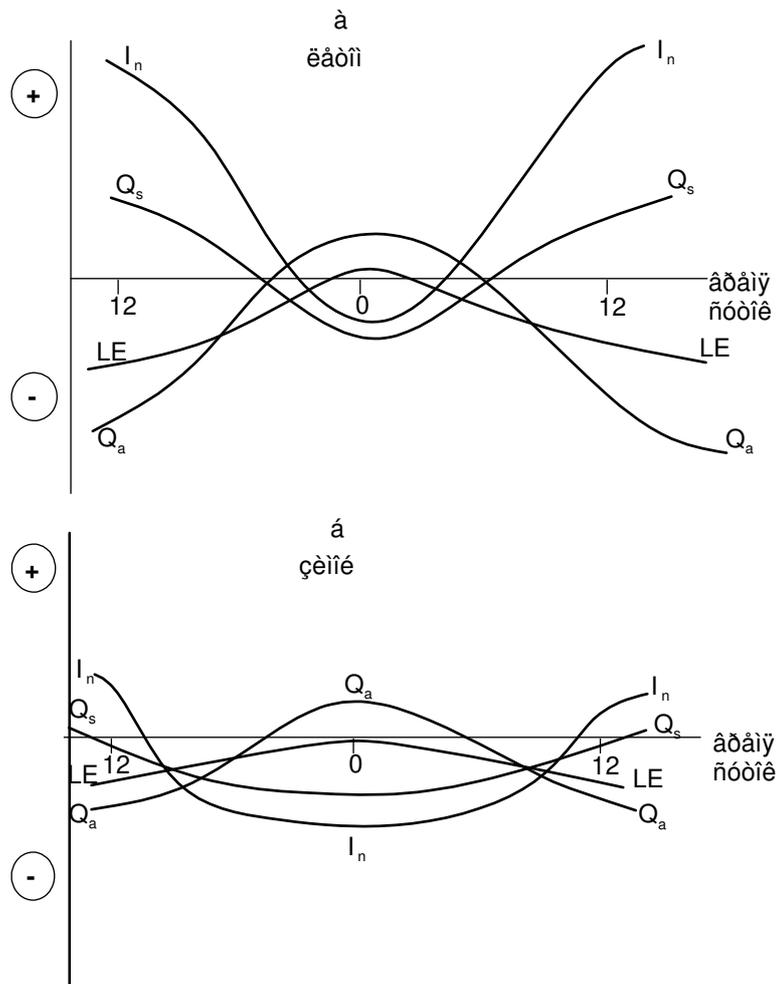


Рис. 2. Суточный ход составляющих теплового баланса в летний и зимний периоды

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 α), 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 – тепло-

вой 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:

$$I_n^l - Q_s^l - H_a^l - (Tp \cdot E)^l - M = 0,$$

где I_n^l – радиационный баланс листа, как разница между потоками абсорбированной и излученной листом энергии, H_a^l – потери тепла на циркуляцию воздуха около листа, $(Tp \cdot E)^l$ – теплопотери на испарение (Tp – транспирация листа, L – теплота парообразования), Q_s^l – тепло-

поток, формирующих теплозапасы листа, а M – энергия, накапливаемая в результате фотосинтеза в химических соединениях. Все составляющие имеют размерность теплоточков, т.е. ватт/м².

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 метеорологических условий 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:

$$I_{\text{ФАР}} = 0.43I_s + 0.57I_a.$$

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:

$$KI_{ФАР} = \frac{U \cdot Y}{\sum Q_{ФАР}} \cdot 100$$

где U – удельная теплота сгорания (калорийность) растительных веществ, кДж/г, Y – урожай сухой фитомассы, кг/м², $\sum Q_{ФАР}$ - сумма ФАР за период вегетации, МДж/м². 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 $KI_{ФАР}$ – 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 КРД 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/м², $\sum Q_{\Phi AP}$ – сумма ФАР за период вегетации, МДж/м².

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 объёмов 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 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.

1.2. 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 перезимов-

ки 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 завядании растения (ВЗ). 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°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 – для теплого периода, для вегетационного сезона.

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

$$КУ = \frac{\sum p}{E_0},$$

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°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:

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

где $B_{\text{климата}}$ – показатель бонитета климата, Y – урожай культуры (в ц/га), $\sum T_{>10^\circ C}$ – сумма средних температур воздуха выше 10°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°C , хотя для многих растений эта температура повышается до $15\text{--}17^{\circ}\text{C}$. Например, у озимых и ранних яровых зерновых среднесуточная температура начала вегетации составляет около 5°C , у поздних яровых она в два раза выше – около 10°C , а у теплолюбивых растений, таких как рис, хлопчатник уже 15°C , не говоря о тропических теплолюбивых (сахарный тростник, финиковые пальмы), у которых она составляет 20°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 $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$, а для тропических многолетних возрастает больше, чем на порядок, до $5000\text{--}6000^{\circ}\text{C}$.

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°C . Тогда можно сложить все среднесуточные температуры для тех дней, когда среднесуточная температура превышала 10°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. 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: суховеев, 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*, заключающееся 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 °С. 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 $\sum T_{>10^\circ C}$ – прогнозируемая сумма активных температур, D – дата весеннего перехода температуры воздуха через 10°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 ос-

нован на балансовом принципе. Он учитывает количество осадков, выпавшее за зимний период до перехода температуры через 5 °С 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 (ΔZB) 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 производственным 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 среднемноголетней 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 относи-*

тельное 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. 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.

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):

$$E = \rho_a D_d (w_0 - w_z) ,$$

где w_0 , w_z и ρ_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.

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.

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 Алпатьева 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 Алпатьева суммарное испарение фитоденаса 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], Σd - 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:

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

ΔW – влага используемая из метрового слоя почвы, m – поливная влага, μP – используемые осадки (μ – 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. II.2.3.

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:

$$E_0 = \rho_a D (W_s - W),$$

где ρ_a – плотность воздуха, D – интегральный коэффициент турбулентной диффузии, а w_s и w – удельные влажности насыщенного водяным 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 использовани-

ем 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:

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

где HB и $B3$ – запасы влаги в соответствующей толще почвы при наименьшей влагоемкости и влажности завядания, а β – 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:

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

где E – скорость испарения, L – скрытая теплота парообразования, Δ – угол наклона кривой зависимости давления насыщенных паров воды от температуры, ξ – психрометрическая константа, I_n – радиационный баланс (или чистая радиация), $LE_a = 0.35(e_a - e)(0.5 + v_2/100)$, 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. 3).

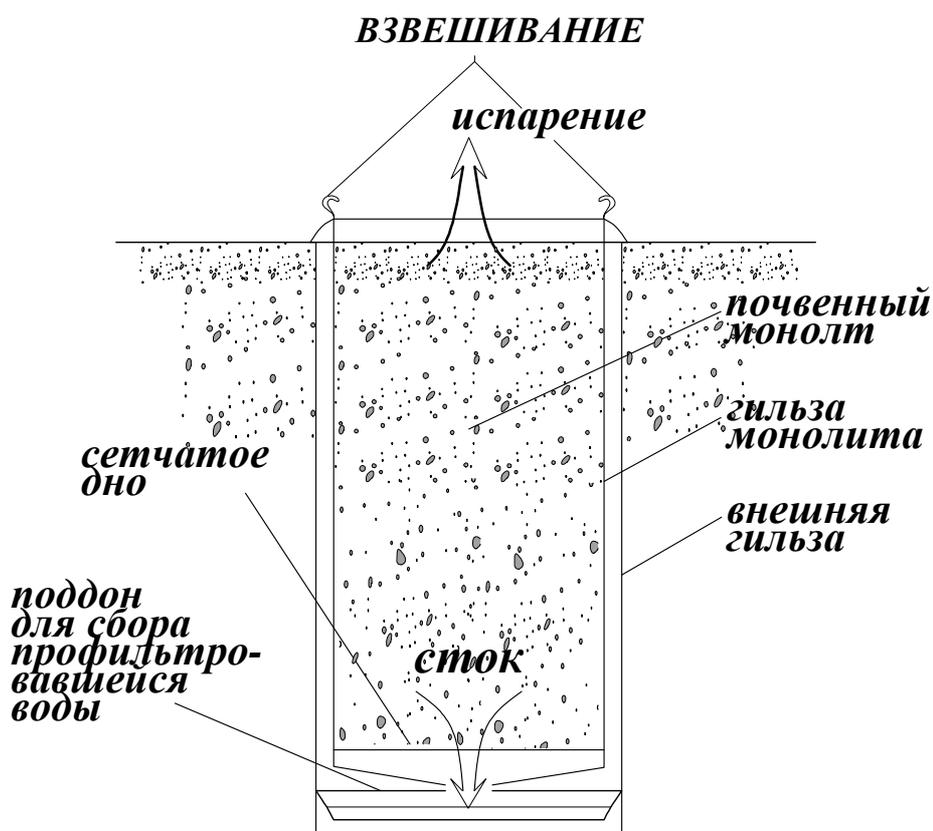


Рис. 3. Схема устройства испарителя

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 см² 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, «плавающая» 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. 4.

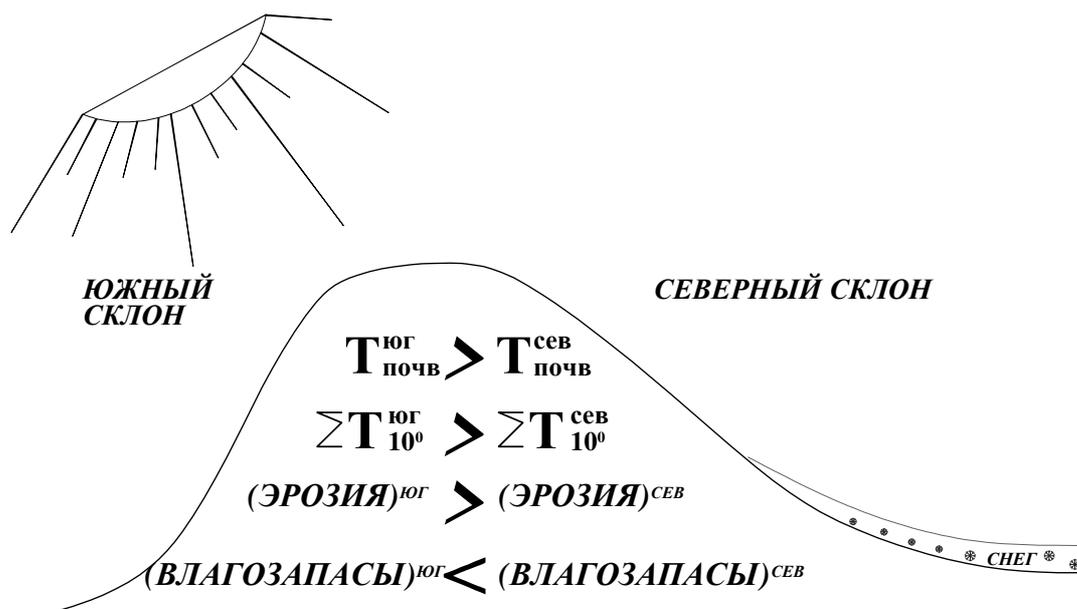


Рис. 4. Распределение агрофизических факторов и свойств почв в зависимости от экспозиции склона

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 значитель-

но 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 м³ 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 *пираномет-*

ров 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. 5, 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.

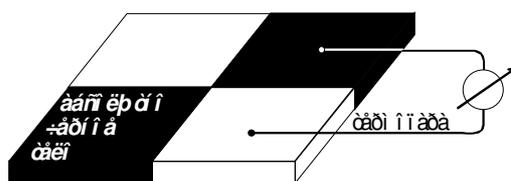


Рис. 5. Схема устройства пиранометра

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/см² мин, рассеянной в условиях ясного неба – 0,1–0,01 кал/см² мин, а для облачного неба – около 1 кал/см² мин.

Об измерении скорости ветра

Скорость ветра измеряется обычно с помощью *анемометров чашечного типа*. Скорость вращения оси с чашечками считается пропорциональной скорости ветра, что проверяется тщательно тарировкой. По количеству оборотов чашечного анемометра легко рассчитать (или использовать соответствующие таблицы, номограммы) скорость ветра. Следует лишь отметить, что при малых скоростях ветра чашечные анемометры 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.

1.3. 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.1 приведены «критические» температуры прорастания и появления всходов для различных растений.

Таблица 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.2).

Таблица 2

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

Температура почвы	Межфазные периоды пшеницы						Длина веге- тац. Пери- ода
	Посев –всхо- ды	Всхо- ды –3-й лист	3-й лист – труб- ка	Труб- ка– Коло- ше-ние	Колоше- ние – молоч- ная спе- лость	Молочная спелость– воскова- ние	
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 спелость. 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. 3).

Таблица 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, стимулируя развитие корней растений. 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 $200\text{--}300^{\circ}$ 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 $200\text{--}300^{\circ}$. 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.

Зимние температуры почвы

На температурные условия произрастания растений существенное влияние оказывает температура зимой. Считается, что снижение температуры почвы до $-9\text{--}-20^{\circ}\text{C}$ (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. 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° .

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 $^{\circ}\text{C}$. Теплопроводность влажной глинистой почвы достигает величин около 0,003 кал/см с $^{\circ}\text{C}$, т.е. выше в 5 раз.

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^3 , вполне применима и традиционная физическая размерность плотности – г/см^3). Например, если взято 100 см^3 снега и из него удалось вытопить 10 см^3 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:

$$\lambda = 0.0067 \rho_{sn}^2,$$

где λ - удельная теплопроводность, кал/см с °С, ρ_{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 4.

Таблица 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 почв (°С)	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°C 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 , где

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

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 15–20°C;

континентальный: сезонная амплитуда температур 20–25°C;

резко континентальный: 25–30°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 удастся выделить пять типов режимов:

1. Холодный – средние температуры на глубине 20 см находятся в диапазоне от 0 до 5°C.

2. Умеренно теплый – от 5 до 10°C.

3. Теплый – от 10 до 15°C.

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°С, хотя на северо–востоке эта разница достигает 3–3.5°С. 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, что *основное уравнение теплопереноса* – уравнение, связывающие изменения температуры во времени с изменением температуры по расстоянию. Для динамики температуры это уравнение имеет вид $\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ – основное уравнение теплопереноса, связывающее изменение температуры почвы (∂T) во времени (∂t) с изменением температуры по расстоянию в направлении градиента (в приведенном написании, – по вертикали (∂z)) через коэффициент теплопроводности, κ , (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 (табл. 5)

Таблица 5

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

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

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 Δz .

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: $\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$. Если перейти к конечным разностям и учитывать обозначение слоев и времени, можно записать

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

или

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

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 κ), 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 κ . Именно функцию температуропроводности, так как она, κ , как мы знаем, зависит от влажности: $\kappa = f(W)$.

Иногда, в продолжение решения указанной имитационной модели делают еще и следующее упрощающее допущение. Предположим, что величина $\frac{\kappa \Delta t}{(\Delta z)^2} \cong 0.5$. 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 $\kappa \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \cong 0.5$. И если исходить из характерных величин температуропроводности для суглинистых почв, находящихся в диапазоне 480-490 см²/сут, расчет вести для 10-см слоев и промежутков времени принять 0,1 суткам (144 мин.), то мы как раз и получим величину $\frac{\kappa \Delta t}{(\Delta z)^2}$, 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 слой 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 теплопроводности и некоторых других параметрах.

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

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

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

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

Если в это уравнение динамики температуры на глубине z ввести основное уравнение теплопереноса ($\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$), 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 $d = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega}}$. 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 теплопроводности 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 теплопроводности 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.

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 теплотерь почвы;
- увеличение температуропроводности почв

Покрытие поверхности темными веществами (торф) приводит к значительному уменьшению альбедо, и, соответственно, к увеличению поглощения почвой энергии. Альбедо – отношение отраженной коротковолновой энергии к поступившей. Уменьшить 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.

Не следует 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. 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.

Глава 2. АГРОФИЗИКА ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА В РАСТЕНИЯХ

2.1. Фотосинтез и дыхание растений

Фотосинтез

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

$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$, где $h\nu$ - лучистая энергия Солнца (кванты света)

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. 6).

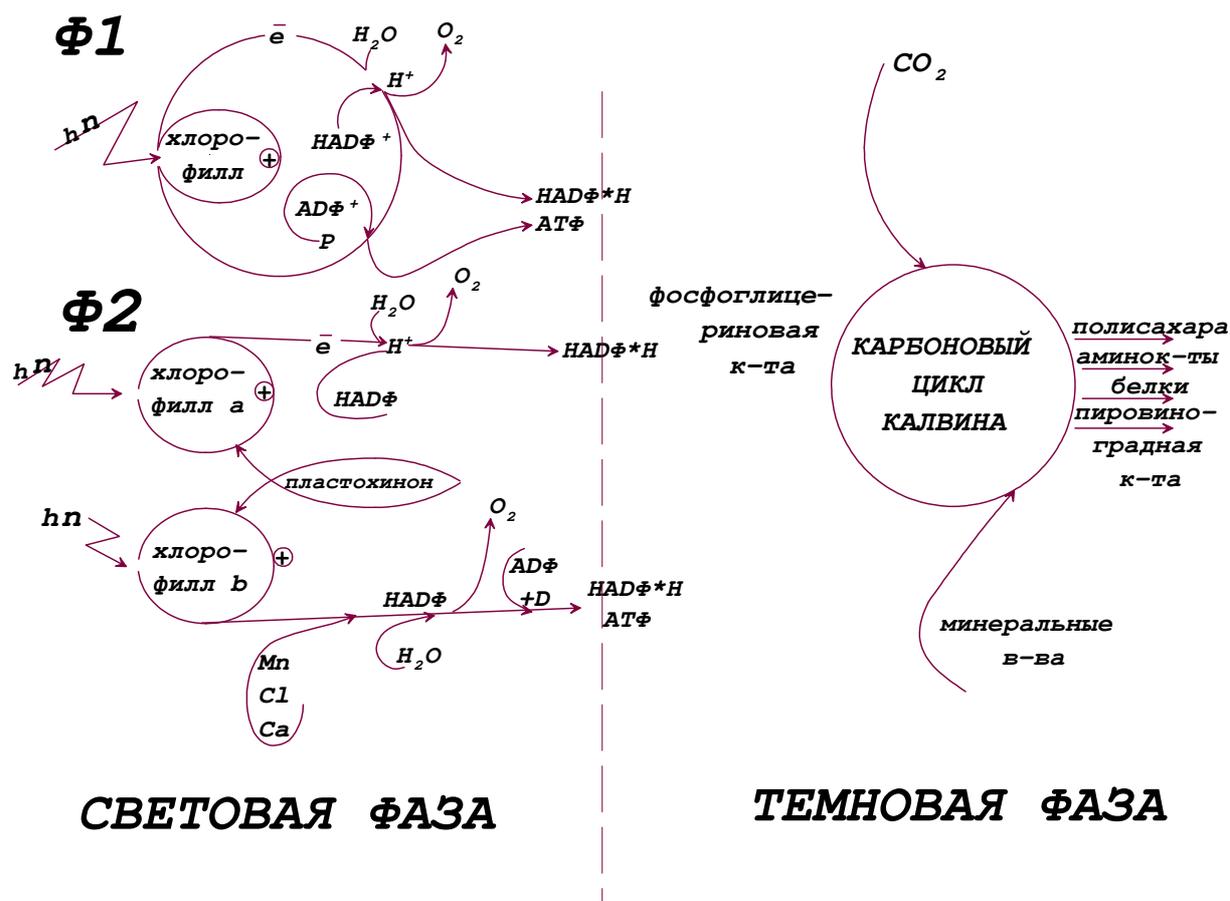


Рис. 6. Схема световой и темновой стадий фотосинтеза. Цикл Калвина

Итак, квант света (преимущественно из красного и синефиолетового 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 · Н. 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. 6, образуются две энергетически «ресурсные» молекулы – АТФ и НАДФ · Н, 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 (ΦI).

Световая фаза фотосинтеза может протекать и нециклически (на рис 6 – $\Phi 2$). 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 6). 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 примере 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 С4-растений. С4-растения нередко называют растениями с «кооперативным фотосинтезом», подчеркивая итог этого способа фотосинтеза в виде формирования С4-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. Продукционный процесс у этих трех групп различен; различны и суточная продуктивность фотосинтеза, и транспирационный коэффициент: суточная продуктивность для С3, 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 CO_2 , а итогом – образование сложных органических веществ–ассимилянтов, формирующих основные запасы, участвующих в процессах дыхания, увеличения биомассы и формирования генеративных и других органов. Не менее важно и 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 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 аккумулято-

ры энергии – молекулы $АТФ$ и $НАДФ \cdot Н$ и выделяется свободный кислород, и темновой, когда за счет энергии, аккумулированной в $АТФ$ и $НАДФ \cdot Н$, 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 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 (λ), соотношение интенсивности поглощения этих лучей (a_λ) и концентрации пигмента (c) имеет следующий вид:

$$a_\lambda = 1 - \exp(-k_\lambda l_\lambda c)$$

где k_λ – константа, а l_λ – 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. 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 $[дж/(м^2 \cdot с)]$, в ваттах $[Вт/м^2]$, а также в $[эрг/(см^2 \cdot с)]$. Все эти размерности энергии можно встретить в литературе. Соотношение их: $[дж/(м^2 \cdot с)] = [Вт/м^2] = 1000 [эрг/(см^2 \cdot с)]$. Кроме того, освещенность, которая существенно зависит от угла падения световых лучей, измеряется в люксах $[лк]$, в люменах на квадратный

метр [$\text{лм}/\text{м}^2$] или в канделлах на квадратный метр [$\text{кд}/\text{м}^2$]. Более подробно физические размерности и характеристические величины изложены в Части II, и в «Справочных материалах».

Если измерять фотосинтез в мг ассимилированного CO_2 на дм^2 поверхности листа в час [$\text{мг}/\text{дм}^2 \text{ ч}$], а интенсивность света - в ваттах на квадратный метр или сантиметр [$\text{Вт}/\text{см}^2$] поверхности, то кривая зависимости фотосинтеза от интенсивности света будет иметь следующий вид (рис. 7).

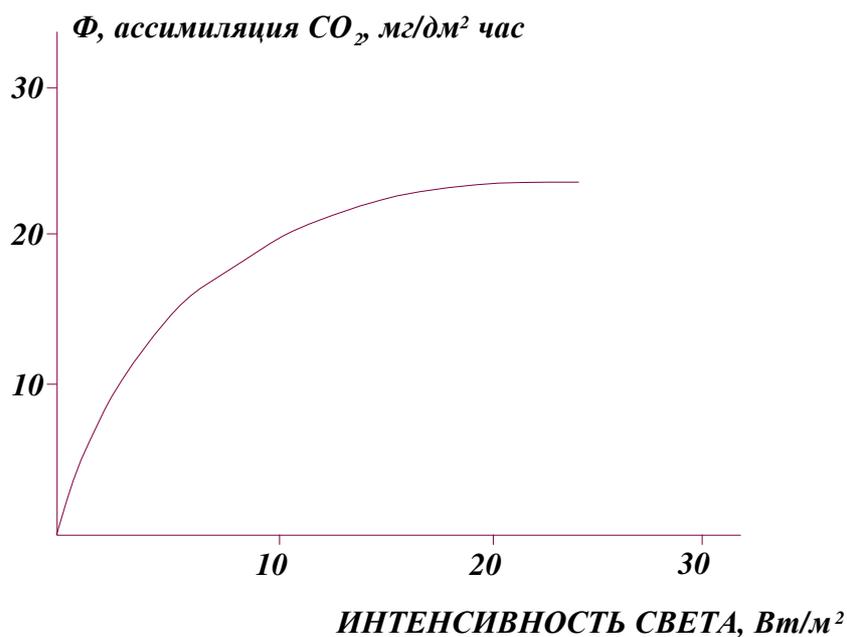


Рис. 7. Световая кривая фотосинтеза - зависимость фотосинтеза (Φ , $\text{мгCO}_2/\text{дм}^2 \text{ ч}$) от интенсивности поступающей лучистой энергии ($\text{Вт}/\text{м}^2$)

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 ис-

пользуют 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.

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 (Φ) и интенсивность фотосинтетически активной радиации ($I_{ФАР}$), $I_{ФАР}$:

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

где Φ_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.

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. На рис. III.1.3 приведены результаты опыта с растениями хлопчатника, выращиваемого в условиях искусственного освещения. Освещенность рас-

тений колебалась от 100 Вт/м^2 (что соответствует 0.08 от мощности прямой солнечной) до 1000 Вт/м^2 , что ненамного превышает мощность прямой солнечной лучистой радиации

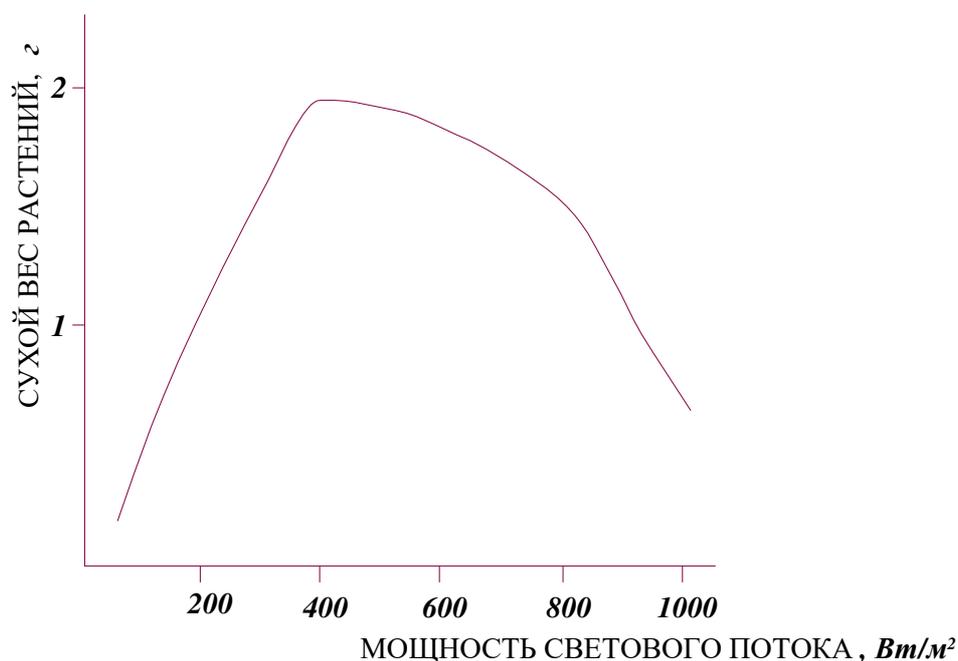


Рис. III.1.3. Влияние мощности лучистого потока на биомассу проростков хлопчатника (по Мошкову, 1959)

Из приведенного рисунка следует, что в искусственных условиях уже при половинной от солнечной мощности света растения достигли максимальной биомассы, а увеличение этой мощности более 800 Вт/м^2 оказалось даже и вредным, понижающим биомассу растений.

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 гауссианы).

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 недаром 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 приходится как раз на зеленую и сине-зеленую области (рис. 8).

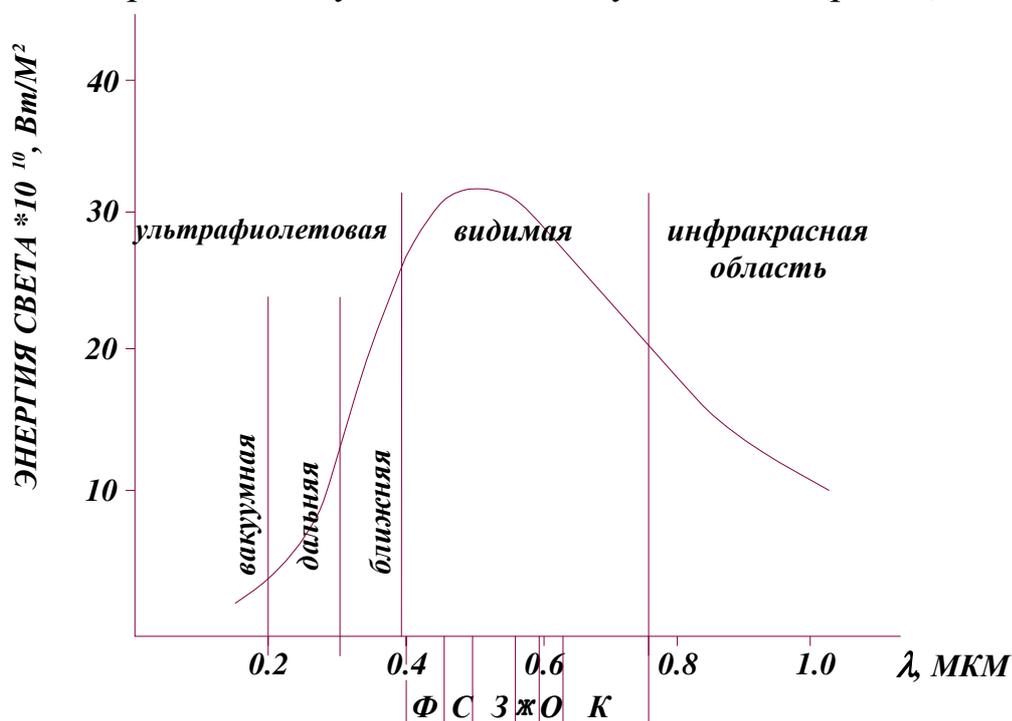


Рис. 8. Распределение световой энергии в спектре дневного солнечного света (по И.А.Шульгину, 1967)

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. 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 9.

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.

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 (рис. 9).

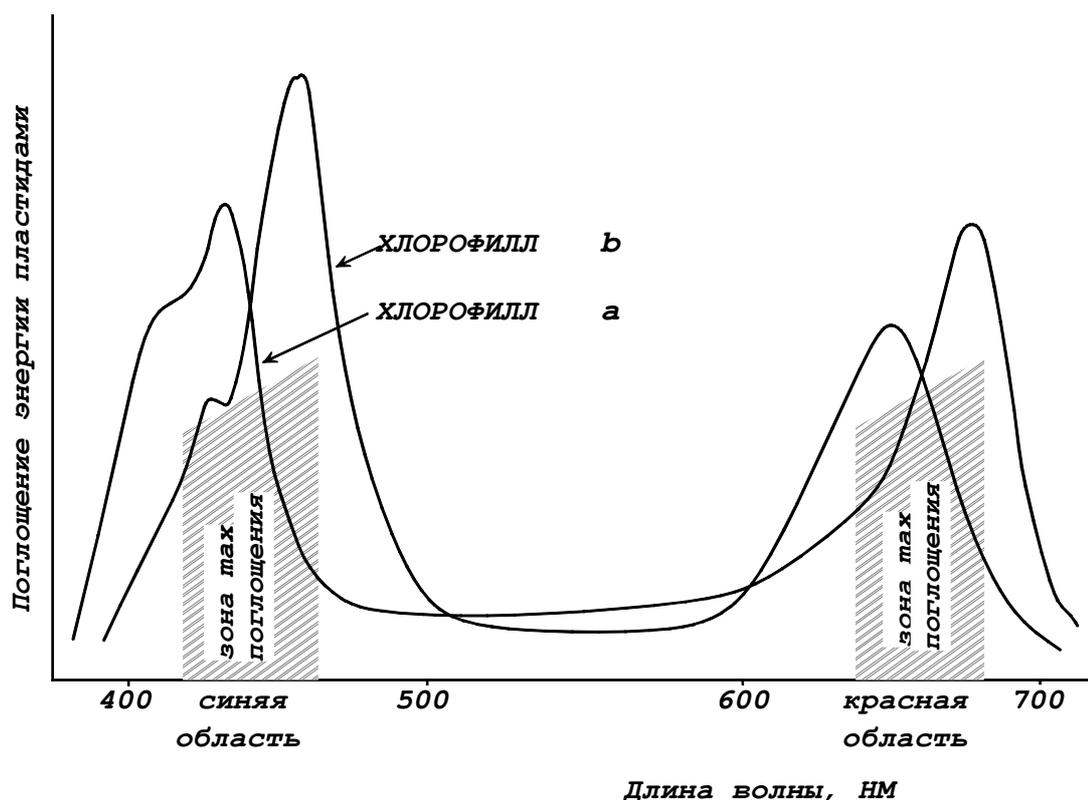


Рис. 9. Спектральная кривая фотосинтеза (представленная по спектрам поглощения пигментов пластид)

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 прогреет, 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», $KI_{ФАР}$.

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. 10). Ширина «купола» этой зависимости будет характеризовать диапазон влажности почвы, при котором фотосинтез происходит наиболее интенсивно и равен величине Φ_0 .

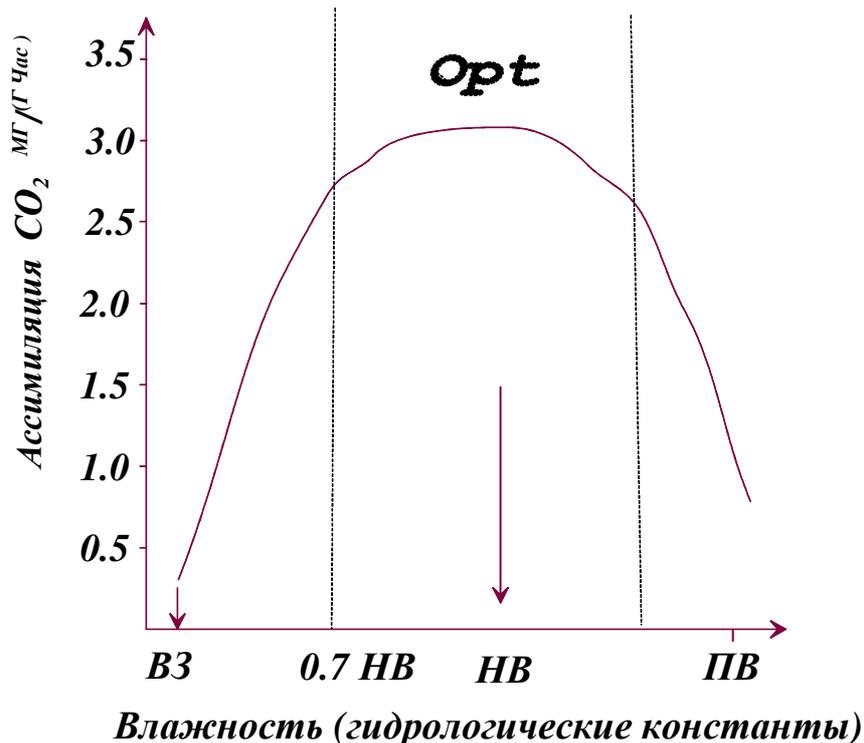


Рис. 10. Зависимость фотосинтеза от влажности почвы, выраженной в виде почвенно-гидрологических констант: ВЗ – влажность завядания, НВ – наименьшая влагоемкость, ПВ – полная влагоемкость или водовместимость

Такой тип куполообразной зависимости с одним экстремумом (максимумом) описывается параболической функцией

$$\Phi = \Phi_0 \left[-a \left(\frac{3B_{\text{ДДВ}}}{3B_{\text{НВ}}} \right)^2 + \epsilon \left(\frac{3B_{\text{ДДВ}}}{3B_{\text{НВ}}} \right) \right], \text{ где } a \text{ и } \epsilon - \text{ эмпирические параметры,}$$

характеризующие изменение фотосинтеза в процессе развития и старения растения, - $3B_{\text{ДДВ}}$ – 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_{Opt} , при которой фотосинтез достигает максимального для данных растений уровня – уровне Φ_0 (рис. 11).

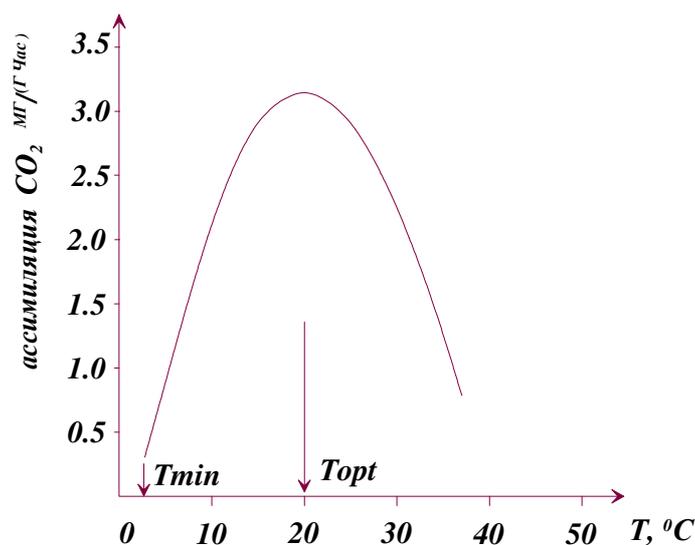


Рис. 11. Температурная кривая фотосинтеза

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°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 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. 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 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% 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 CO_2 (C3 или C4-типами). Но в любом случае, получается, что при содержании 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 CO_2 , хотя бы в небольшие промежутки времени для интенсификации фотосинтеза и ускорения ростовых процессов.

Таким образом, содержание CO_2 является лимитирующим фактором фотосинтеза. Оно определяет газовую функцию фотосинтеза, условия поступления и движения CO_2 к пластидам. Причем в большей мере это лимитирующее действие проявляется не столько в концентрации в атмосфере (она, как мы только что выяснили практиче-

ски константа), а в пути следования CO_2 к фотосинтетическим пигментам. А этот путь таков: CO_2 диффундирует из воздуха через устьица в межклеточное пространство. Затем 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 CO_2 на пути к хлоропластам: сопротивление воздуха вблизи поверхности листа (диффузионное сопротивление воздуха – r_a), диффузионное сопротивление устьиц при поступлении CO_2 в межклетники (r_s) и диффузионное сопротивление движению CO_2 в клеточном растворе, в мезофилле (r_m). Как правило, эти сопротивления и являются ограничивающими фотосинтез в отношении фактора 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 (Φ) от указанных сопротивлений:

$$\Phi = \frac{c_0 - c_i}{r_a + r_s + r_m},$$

где c_0 и c_i – концентрации CO_2 в атмосфере и вблизи хлоропластов (г $\text{CO}_2/\text{см}^3$). Это уравнение в качественном виде показывает значение диффузионных сопротивлений на различных участках процесса диффузии 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 – темпера-

туру воздуха. Однако, не просто температуру, а эффективную температуру, как правило, температуру более 10⁰С. 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. 12 видно, что резкое увеличение биомассы происходит в стадии формирования колоса, когда в растении с наибольшей активностью работает фотосинтезирующий аппарат, формируются запасы органических веществ.

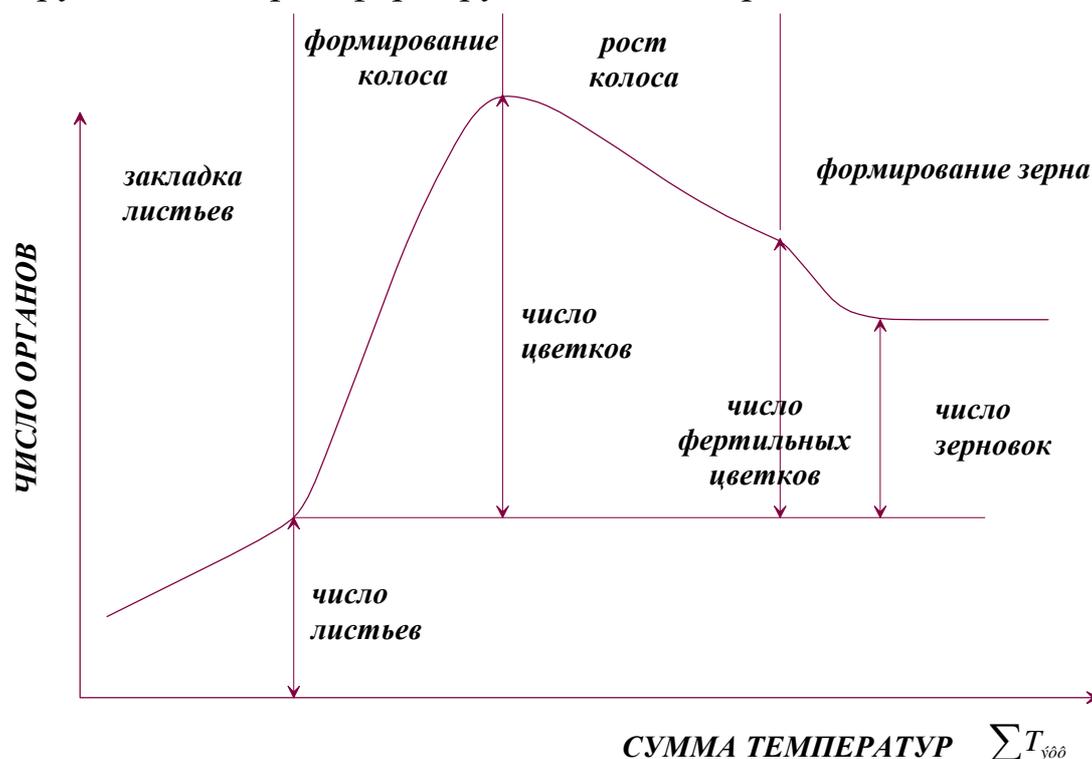


Рис. 12. Число органов на различных стадиях онтогенеза зерновых в зависимости от суммы эффективных температур

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 «форми-

вание 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. Вот такого рода кривые нередко используются для прогноза наступления стадий и оценки числа органов в растений.

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 диапа-

зоне 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 (Φ_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).

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 полностью компенсировать недостающий фактор среды (освещенность) другим (содержанием CO_2 в воздуха) не удастся, возможно только регулирование в

определенном диапазоне. Приведенные на рис. 13 зависимости как раз и указывают эти возможности регулирования.

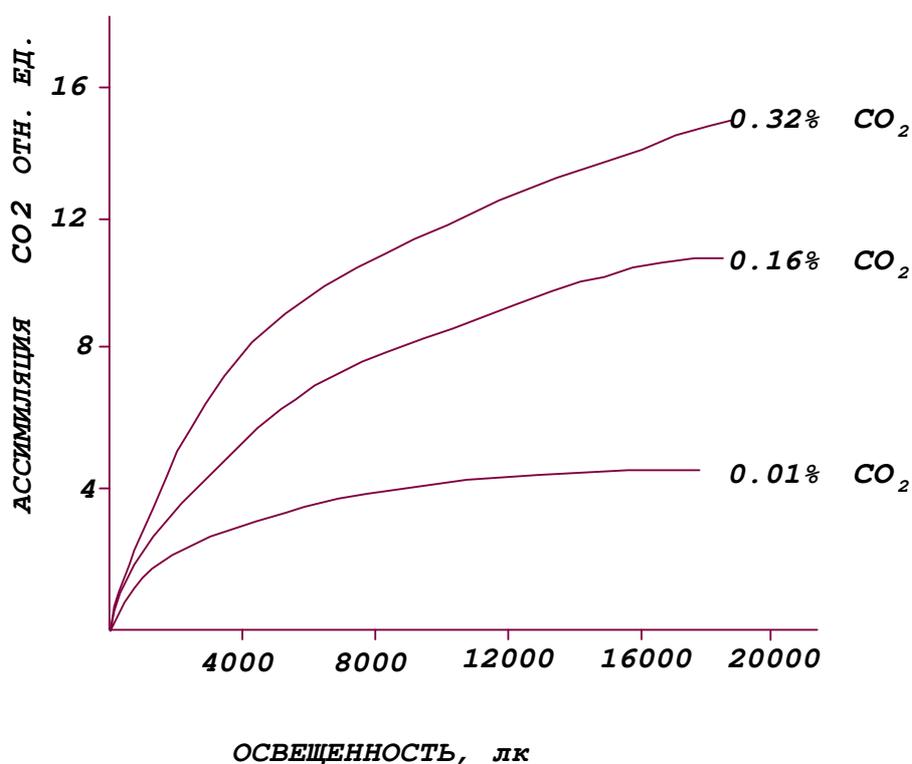


Рис. 13. Световые кривые фотосинтеза при различной концентрации CO₂

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. 14).

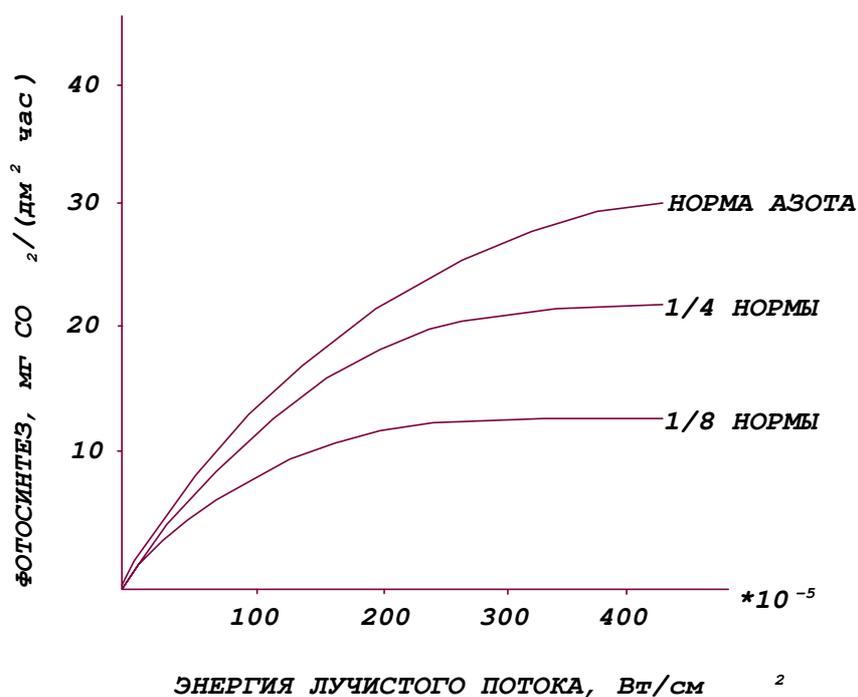


Рис. 14. Световые кривые фотосинтеза при различных дозах азота (по А.Н.Полевому, 1988)

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 изменяющееся при дальнейшем увеличении световой энергии (Φ_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. 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).

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 - Φ_0 [мг $\text{CO}_2/\text{дм}^2 \cdot \text{ч}$]. Для пересчета этой величины к реальным условиям (Φ_τ) необходимо учесть изменение фотосинтеза для реальных значений температуры и содержания влаги в почве. Примеры таких функций пересчета мы уже знаем, обозначим их как параметры α_T и α_W :

$$\alpha_T = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_0} = 0.2 \frac{T - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T} \left[6 - \left(\frac{T - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right)^5 \right]$$

$$\alpha_W = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_0} = -a \left(\frac{3B}{3B_{\text{не}}} \right)^2 + e \left(\frac{3B}{3B_{\text{не}}} \right)$$

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 10^0C . 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 α_{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:

$$\Phi_\tau = \Phi_0 \cdot \alpha_T \cdot \alpha_W \cdot \alpha_{\text{ONT}}$$

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 CO_2 и поглощение O_2 .

Весьма схематично процесс дыхания представлен на рис. 15, на котором изображены два основных участка процесса дыхания: цикл Кребса и дыхательная цепь, в которой и осуществляется окислительное фосфорилирование.

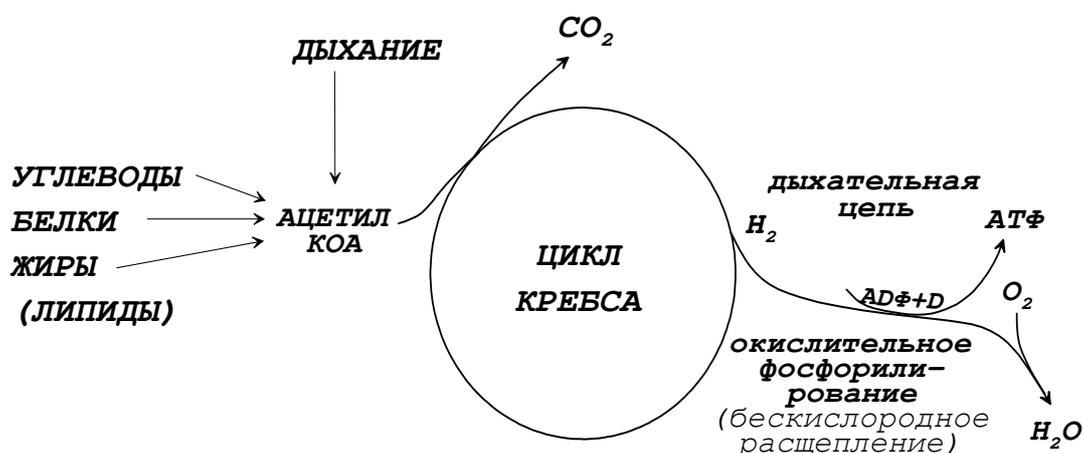


Рис. 15. Схема процесса дыхания (цикл Кребса)

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». «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.

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:

$$R = R_0 Q_{10}^{0.1(T-T_0)}, \text{ где } R_0 \text{ и } T_0 \text{ – исходное дыхание и температура}$$

В целом, функция дыхания – также одновершинная кривая, аналогичная температурной кривой фотосинтеза. Обе эти кривые представлены на рис. 16.

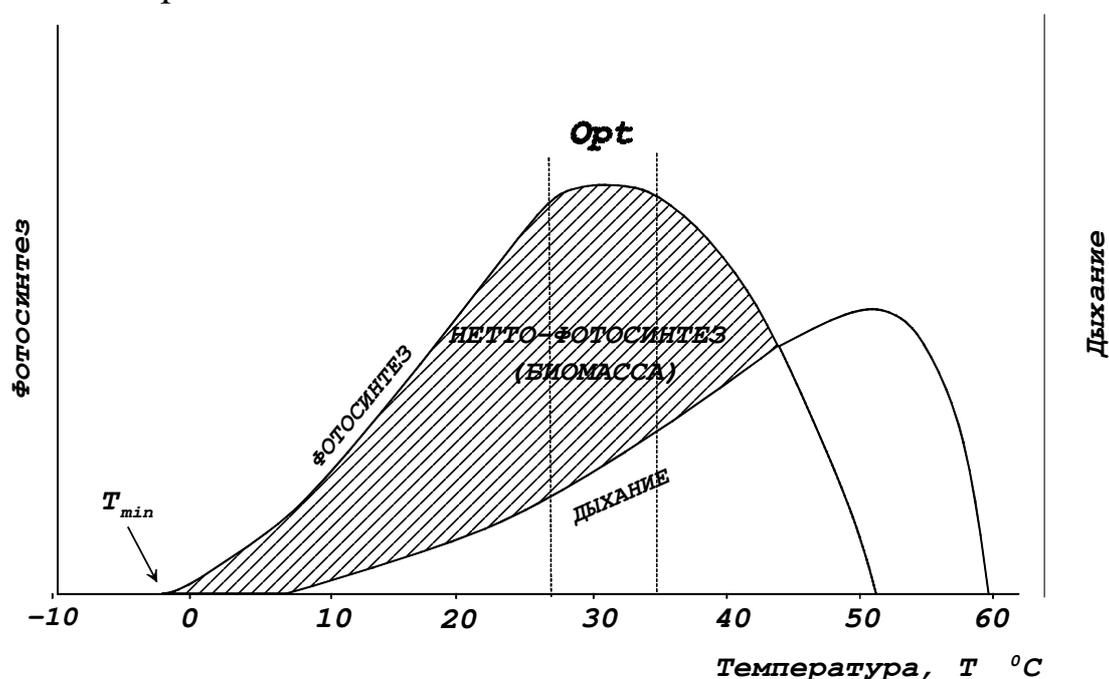


Рис. 16. Температурные кривые дыхания и фотосинтеза (по А.Н.Полевому, 1988)

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.

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 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.

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).

2.2. Растение и вода

Характеристики влаги в почве. Влажность почв

В предыдущей главе мы уже отмечали зависимость основной составляющей продукционного процесса, - фотосинтеза, - от содержания влаги в почве (рис. 5). Для того, чтобы подробнее разобраться в физике водного питания растений, прежде всего, остановимся на характеристике почвенной влаги.

Первая, – и важнейшая, – это влажность почвы.

Влажность в агрофизике и 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 [%])

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

где m_w – масса воды, m_s – масса твердой фазы, $m_{\text{вл}}$ – масса влажной почвы, $m_{\text{сух}}$ – 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 (θ , см³/ см³):

$$\theta = \frac{m_w}{V_t}$$

Нетрудно показать, что объемная и весовая влажности взаимосвязаны через плотность почвы (ρ_b): $\theta = W \rho_b$.

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

$$3B = \frac{W\rho_b h}{100} \text{ [см водного слоя]}, \text{ где } h \text{ – мощность слоя в см, } \rho_b \text{ –}$$

плотность почвы в г/см³, W – влажность массовая (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. Эта характеристика влажности является самой важной в агрономии. Именно по запасам влаги оценивают и прогнозируют агротехническое состояние почвы, т.е. её готовность для полевых работ, влагообеспеченность посевов, вегетирующих культур. В таблице 2 в разделе «Взаимосвязь почвенной влаги и урожая растений» приведены классификации продуктивных (НВ–ВЗ) запасов влаги в слоях 0–20 и 0–100 см для зерновых культур на суглинистых почвах. Такие величины запасов влаги в слое 0–20 см, как 30 мм водного слоя, и в слое 0–100 см как 100 мм следует запомнить, так как они отражают оптимальные запасы влаги для растений в начале вегетации. Если запасы влаги ниже этих величин, это может сказаться на потери урожая вследствие почвенной засухи.

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 повнно–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

Начнем с условий, когда все поровое пространство заполнено водой. Эта величина влажности называется *полной влагоемкостью* или *водовместимостью*, W_s или θ_s . Теоретически величина θ_s должна быть равна порозности, ε , 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, $\theta_{кв}$. Здесь поровое пространство, кроме заполненных водой капилляров, уже будет содержать некоторое количество воздуха. Его количество будет равно $\varepsilon_{кв} = \varepsilon - \theta_{кв}$. 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 $\theta_{нв}$ (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.

Таким образом – наименьшая влагоемкость – важнейшая 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*»: $\varepsilon_{\text{возд}} = \varepsilon - \theta_{\text{НВ}}$. 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 обеспеченными влагой (влагообеспеченными). И при ВРК они еще явно не страдают от недо-

статка влаги. Однако предположим, что почва продолжаете 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 см³ до стадии третьего листа. 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.

Если и дальше иссушать почву, то у самой её поверхности в период засухи будет наблюдаться влажность, соответствующая максимальной гигроскопической влажности. Эта величина – также «рубежная», характеризующая наличие в почве адсорбированной, прочно-связанной 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_{mg}) – 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_e) – влажность почвы, свойственная образцу в атмосфере лаборатории. Относительная влажность воздуха (или отно-

сительное 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, $m_{в-с}$) навески: $m_{a-c} = \frac{m_{в-с}}{W_2 + 1}$, если W_2 выражена в [г/г] или $m_{a-c} = \frac{m_{в-с} \cdot 100}{W_2 + 100}$ 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 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.

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. 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.

$W/НВ$ – *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.

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 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. 6.

Таблица 6

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. 6 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 (Tr , см/сут, $\Gamma_{H_2O}/\Gamma_{сух.в-ва}$ 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 см²) 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 ≈ 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.

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_n), в корне (P_k), в листе (P_l) и в атмосфере (P_a). Рассмотрим распределение этих давлений в рассматриваемой системе (рис. 17).

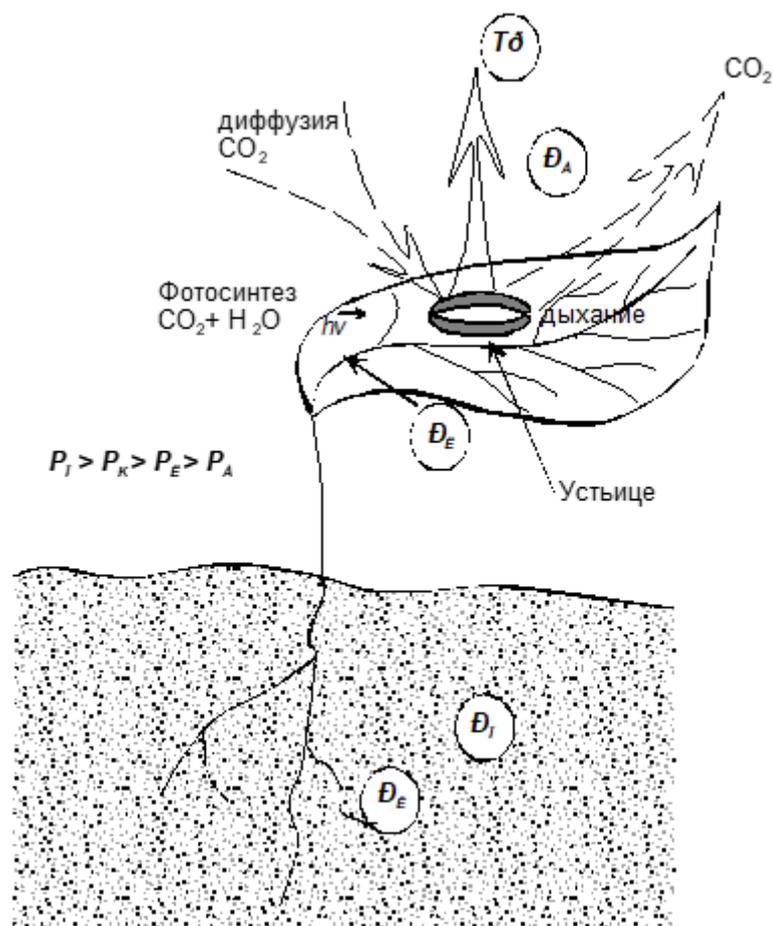


Рис. 17. Движение влаги в системе «почва-растение-атмосфера» и основные процессы в растениях

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 ластва 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. 18).

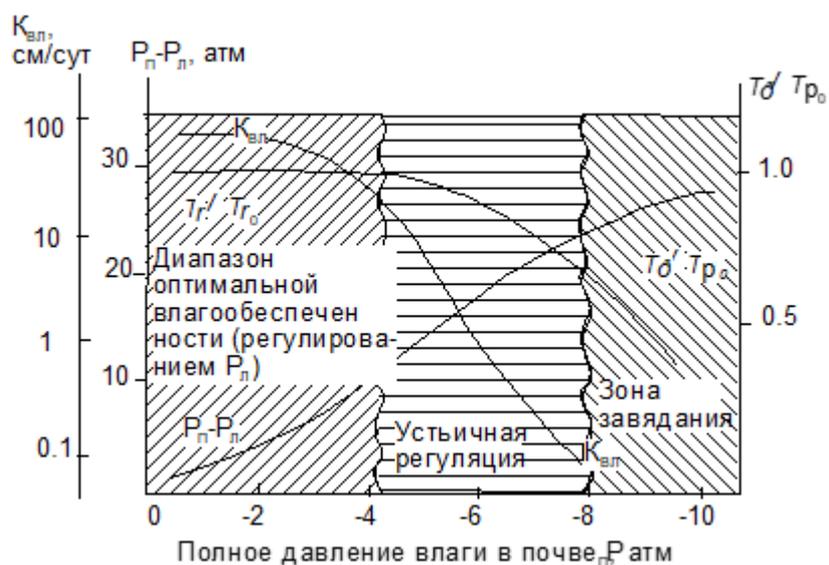


Рис. 18. Изменение относительной транспирации (Tr/Tr_0), перепада давлений влаги между почвой и листом ($P_n - P_l$) и коэффициента влагопроводности ($K_{вл}$) в процессе иссушения почвы, при уменьшении давления влаги в почве (P_n)

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. 18 – 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.

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.

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. 19 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.



Рис. 19. «Транспирационная кривая»

Эта зависимость имеет несколько характерных точек. Две из них относятся к очень низкой (близкой к нулевой) транспирации: на рис. 19 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 анаэробии за 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.

Указанная точка перелома на транспирационной трапеции соответствует давлению входа воздуха в почвенное поровое пространство, или давлению барботирования (P_b). 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_6 (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.

- 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.

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 rF 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/см³]. 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).

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. 20, 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).

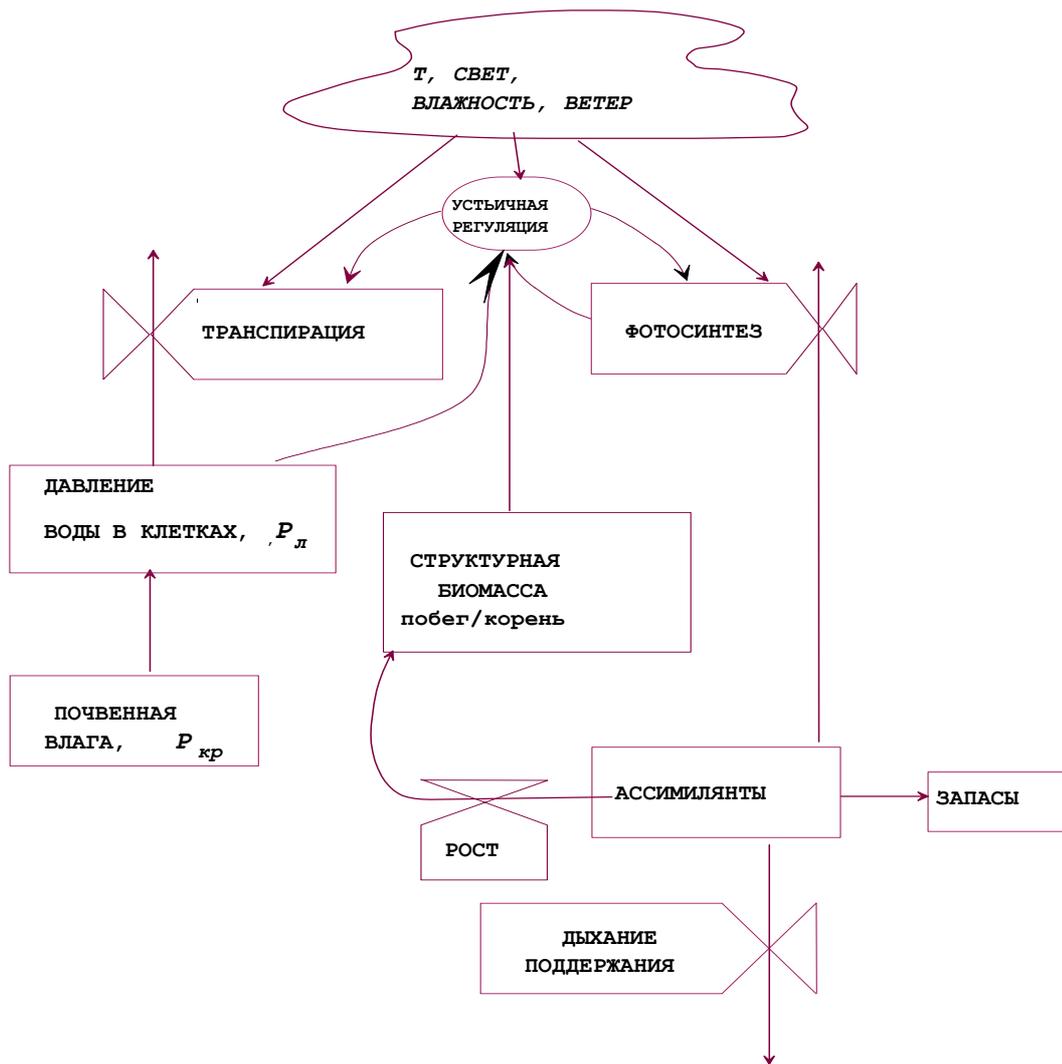


Рис. 20. Схема взаимосвязи процессов транспирации, фотосинтеза, дыхания поддержания, формирования биомассы в зависимости от влагообеспеченности растений

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 CO_2 околоустьичной полости. Если концентрация CO_2 снижается, - устьица открываются. Поэтому, при восходе солнца, при активизации процесса фотосинтеза, увеличении потребления CO_2 из межклетников и околоустьичной полости обяза-

тельно 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 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 лапы в атмосферу.

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.Харвенко по оценке влагообеспеченности по метеопараметрам. В данном разделе рассмотрим оценку влагообеспеченности по запасам влаги в почве.

На рис. 21 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.

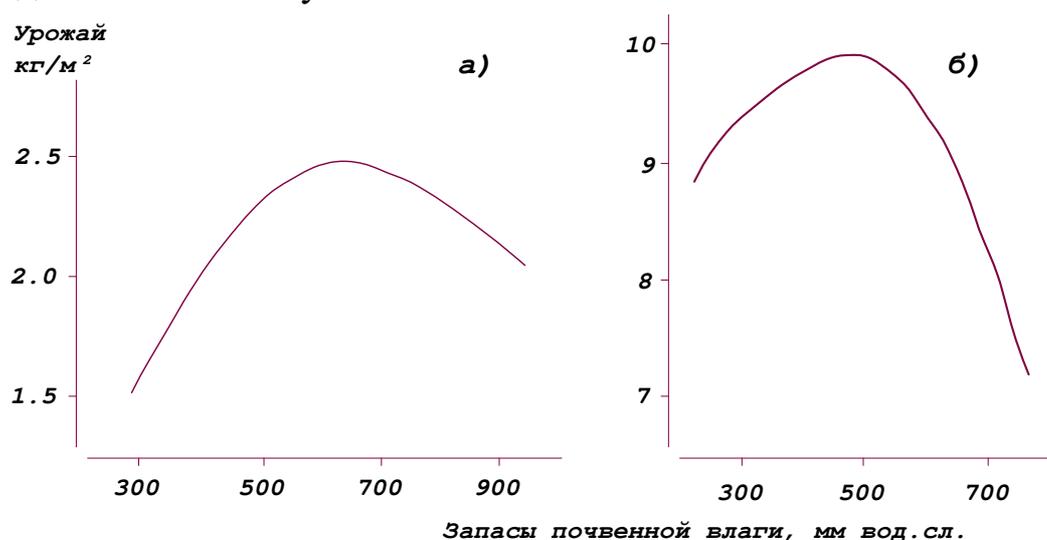


Рис. 21. Зависимость урожая томатов (а) и перца (б) от запасов влаги в метровой толще почвы

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.7.

Таблица 7

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 появлении всходов	>30	10-30	<10
В слое 0-100 см при цветении или 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_{Σ}). Обозначим это отношение, как эффективность водопотребления растений (ЭВР)

$$\text{ЭВР} = \frac{\text{биомасса(сухая)}}{\text{эвапотранспирация}} = \frac{Y}{E_{\Sigma}}$$

Эта величина может быть выражена как в кг/мм водн.сл., так и в т/га/м³/га, т.е. в т/м³ 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, K_t . 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 оказыва-

ется 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. 22).

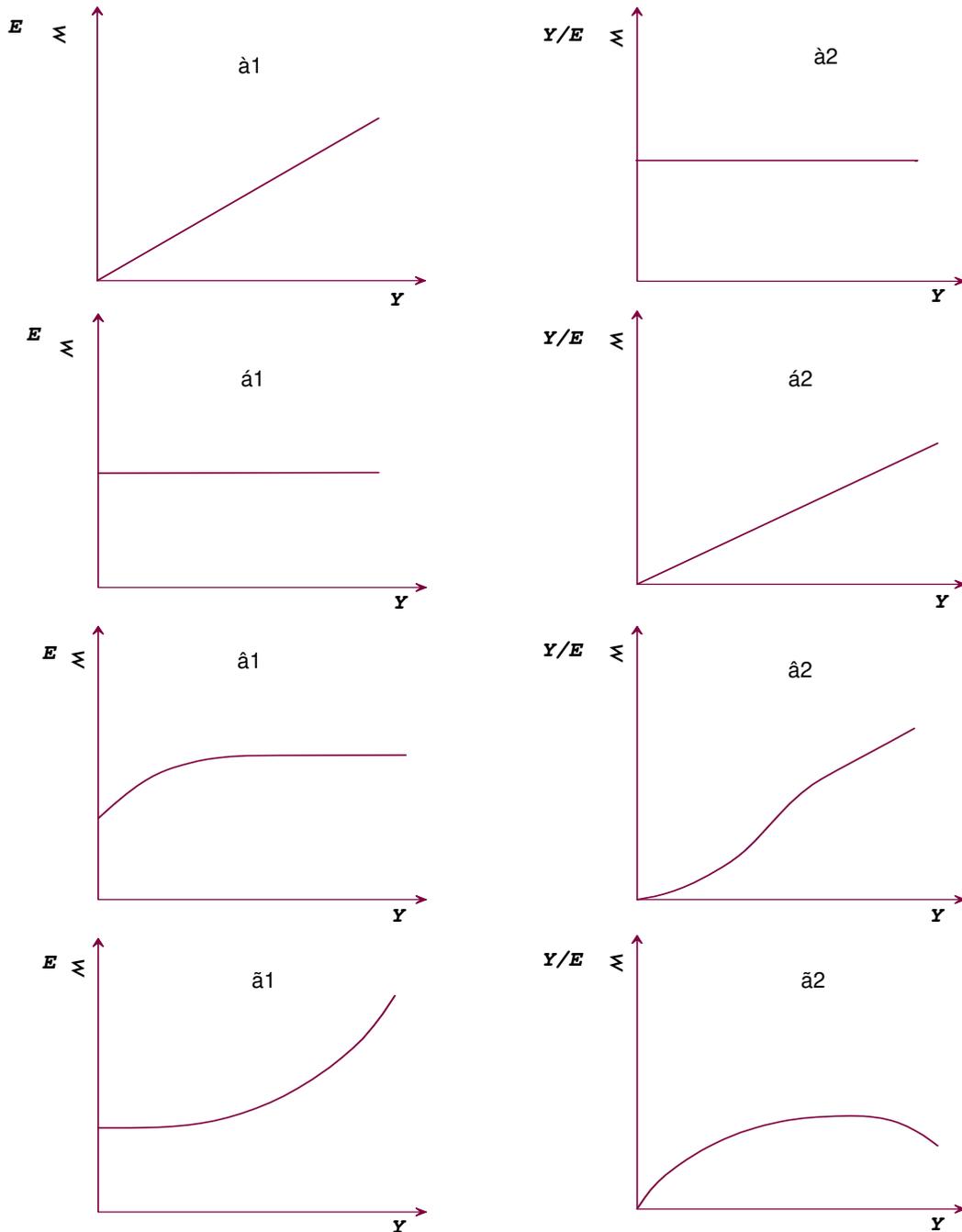


Рис. 22. Зависимости эвапотранспирации (E_{Σ}) ($\hat{a}1$, $\hat{b}1$, $\hat{v}1$ и $\hat{r}1$) и эффективности водопотребления растений (Y/E_{Σ}) ($\hat{a}2$, $\hat{b}2$, $\hat{v}2$ и $\hat{r}2$) от урожая (Y) (по F.G.Viets, 1981)

На рис. 22, а1 представлена характерная зависимость увеличения эвапотранспирации при пропорциональном увеличении урожая. Этот путь оказывается не слишком эффективным: ЭВР постоянен (рис. 22, 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. 22, 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. 22, в1). Сначала на поверхности почвы нет растений (начальный участок на рис. 22, 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. 22, в2). Это благоприятная ситуация, указывающая, что эффективность повышается за счет использования солнечной энергии, - наиболее эффективный путь повышения урожая. И, наконец, наиболее реалистичная ситуация (рис. 22, г1). Сначала, пока растения еще не появились на поверхности почвы, все определяет испарение. И, как и в предыдущем случае, ЭВР равна нулю (рис. 22, 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. 22, г2.

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. 23)

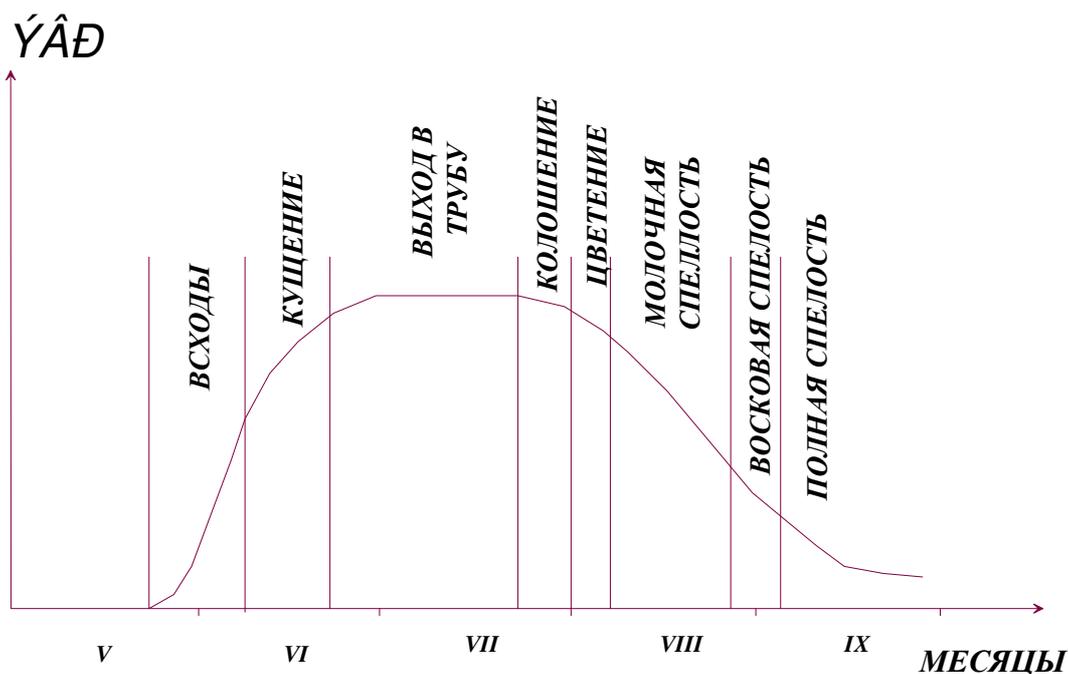


Рис. 23. Характерный вид динамики ЭВР в течение вегетационного развития (для условий засушливых лет центральной части России).

Как видно из рис. 23, 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_{Σ}):

$$\text{ЭВР} = \frac{\text{биомасса(сухая)}}{\text{эвапотранспирация}} = \frac{Y}{E_{\Sigma}}$$

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 засухоустойчивые 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 рядках и расстояние между рядками, 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 глубинных 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 влагообеспеченности условиях. На рис.24 приведены зависимости ЭВР от урожая, значения которого повышалось в одних и тех условиях за счет внесения азотных удобрений.

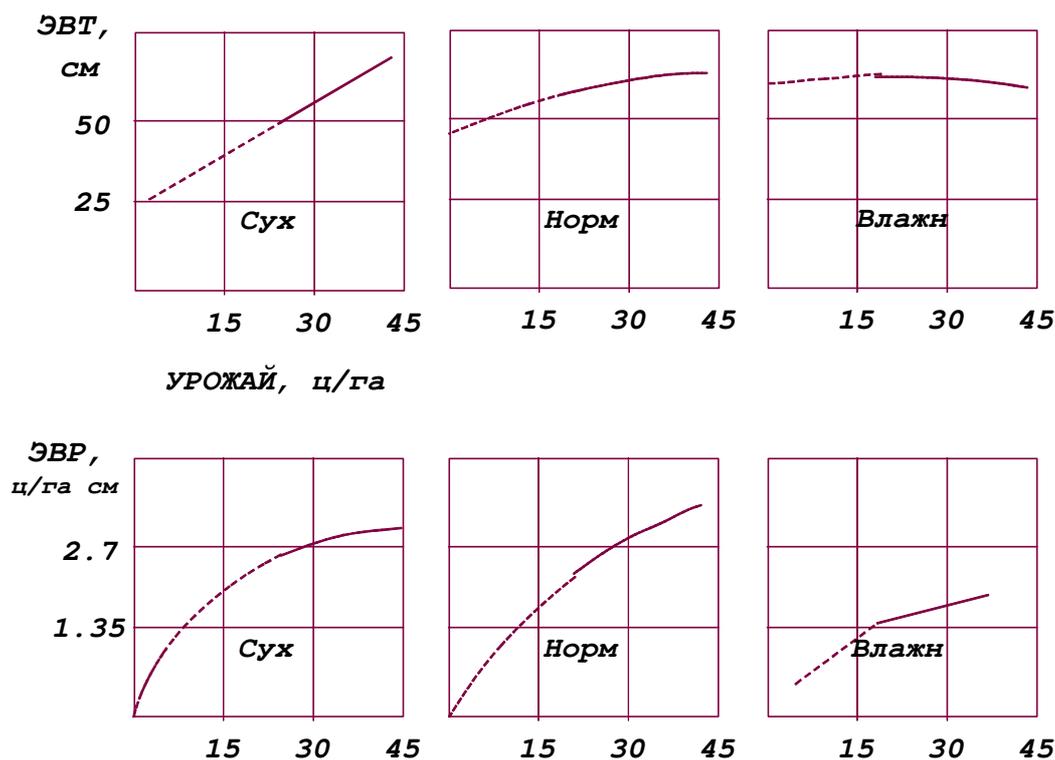


Рис. 24. Зависимость эвапотранспирации (ЭВТ, см водн.слоя) и эффективности водопотребления растений (ЭВР, ц/га см) от урожая растений (У, ц/га), увеличение которого достигнуто внесением азотных удобрений. Пунктиром обозначены гипотетические части этих кривых. (По Viets, 1981)

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.

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.

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.8. 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 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 SO_2 и 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 B_{12} , который принимает участие в фиксировании азота *Rhizobia*.

Таблица 8

Основные химические элементы жизнеобеспечения растений и формы их потребления

Макроэлементы	Макроэлементы вторичной потребности	Микроэлементы
Углерод (CO_2)	Кальций (Ca^{2+})	Бор (H_2BO_3^-)
Кислород (O_2)	Магний (Mg^{2+})	Хлор (Cl)
Водород (H_2O)	Сера (SO_4^{2-})	Кобальт (Co^{2+})
Азот (NH_4^+ , NO_3^- и N_2 для бобовых)		Медь (Cu^{2+})
Фосфор (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-})		Железо (Fe^{2+})
Калий (K^+)		Марганец (Mn^{2+})
		Молибден (MoO_4^{2-})
		Цинк (Zn^{2+})

Основные механизмы переноса веществ

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 25 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.

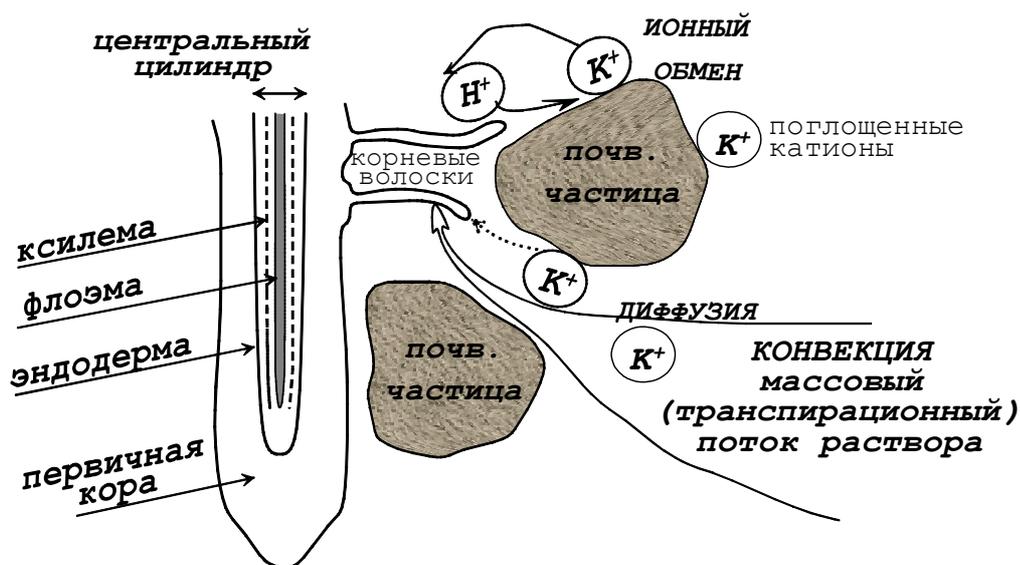


Рис. 25. Схема процессов подтока веществ к корню растения

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. 9.

Таблица 9

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
Са	2,2	4,4	33,0	Возможно
Mg	1,8	3,6	28,0	Возможно
К	20,0	40,0	4,0	Невозможно
Р	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

см²/сут. Для иона К коэффициент диффузии в растворе составляет 1,71, ионов NO₃ – 1,64, Са и Mg – 0,67 и 0,6 см²/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 Н₃РO₄⁻ – 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-Ментен

$$J_r = \frac{J_{\max} \cdot K_m c}{1 + K_m c} - c_{\min}$$

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. 10.

Параметры модели потребления ионов корнями растений

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.

Определения

Подток минеральных веществ к корню осуществляется в виде конвективного и диффузионного потоков. Биофильные элементы, такие как Са 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), гидродинамической 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 (рис. 26).

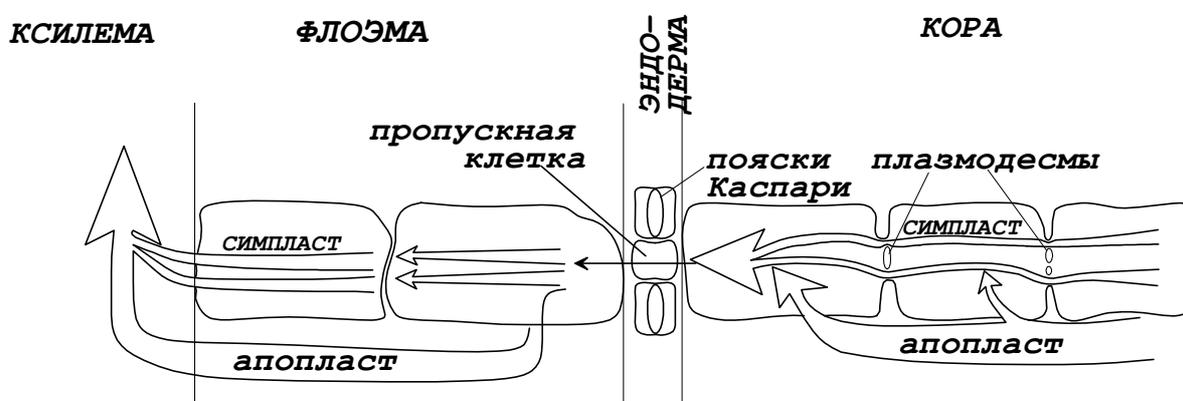


Рис. 26. Движение веществ по корню: симпластический и апопластический переносы

Здесь также основной тип переноса – диффузионный, по градиенту концентрации. Этот 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. 26). 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.

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 растении, переноса их в семя и в оболочку плода указывает приведенная на рис. 27 схема баланса и потоков углерода, азота и воды.

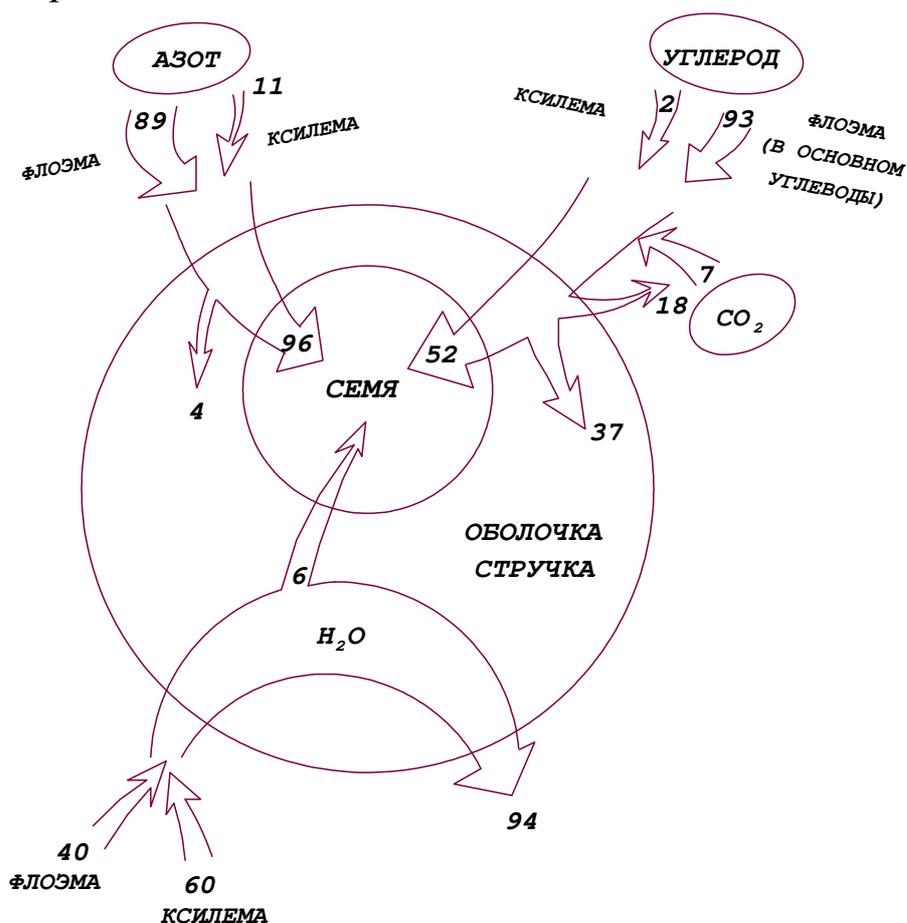


Рис. 27. Схема баланса и потоков углерода, азота и воды (указаны цифры в процентах) в семя и оболочку плода люпина (по J.S.Pate et al, 1977)

Из этой схемы видно, что в основном транспорт веществ по растению к его плодам осуществляется по флоэме. Можно сказать, что транспорт аминокислот, азота и других веществ к потребляющим зонам, зонам активного дыхания, происходит преимущественно по флоэме. 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 45⁰С. А оптимальная температура флоэмного транспорта лежит в диапазоне 22–25⁰С, 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. 28)

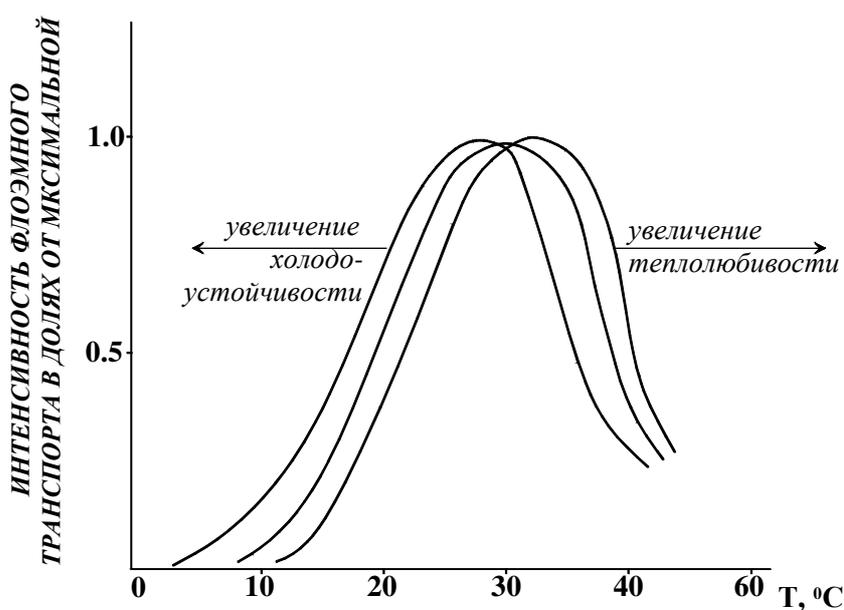


Рис. 28. Зависимость интенсивности флоэмного транспорта для растений при увеличении их теплолюбивости

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 ксилеме**. На этом этапе движение в большей мере регулируется интенсивностью транспирационного тока, т.е. по конвективному типу.

Глава 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. 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.

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. 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, с максимумами в области 400 и 600–700 нм, однако, не 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 с особенностями поглощения света листовой поверхностью, особенностями физических процессов в фотосинтетическом аппарате листа, а не только его пигментной части.

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 29 а, б.

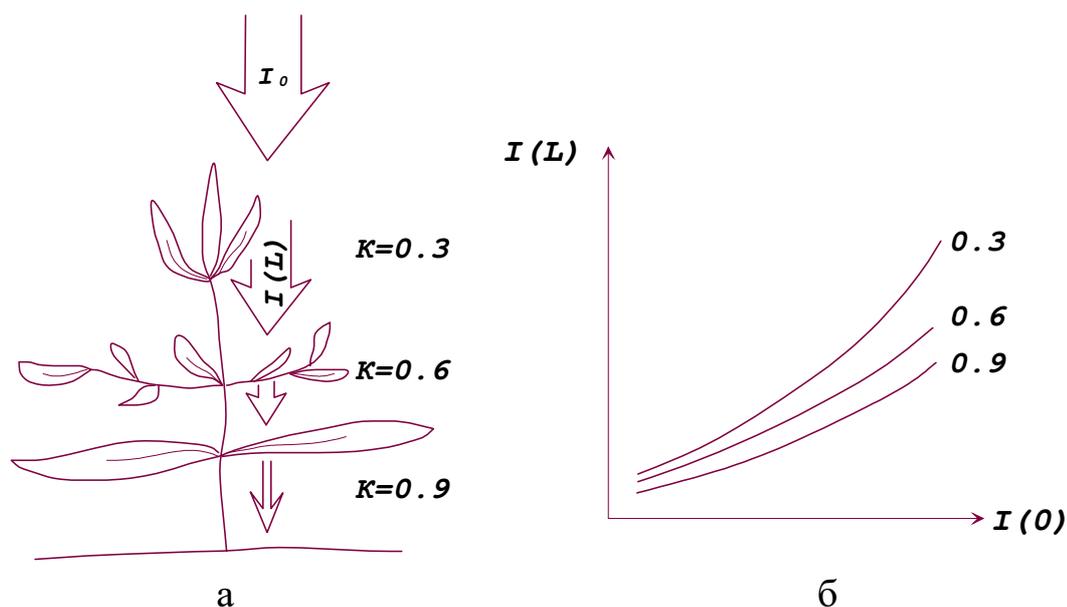


Рис. 29. Зависимость распределения коэффициента поглощения в растительном покрове при различном расположении листьев (а) и изменение светового потока внутри растительного покрова при различных коэффициентах поглощения листьев (б)

Для горизонтально расположенных листьев, для которых коэффициент K близок к 0,9, практически вся световая энергия усваивается растениями. И, напротив, при вертикально расположенных листь-

ях, когда K приближается к 0,3, зависимость довольно крутая, и увеличение поступающей энергии будет приводить к увеличению поглощения, – растения чувствительны к фактору поступающего света.

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. 30). 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.

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.

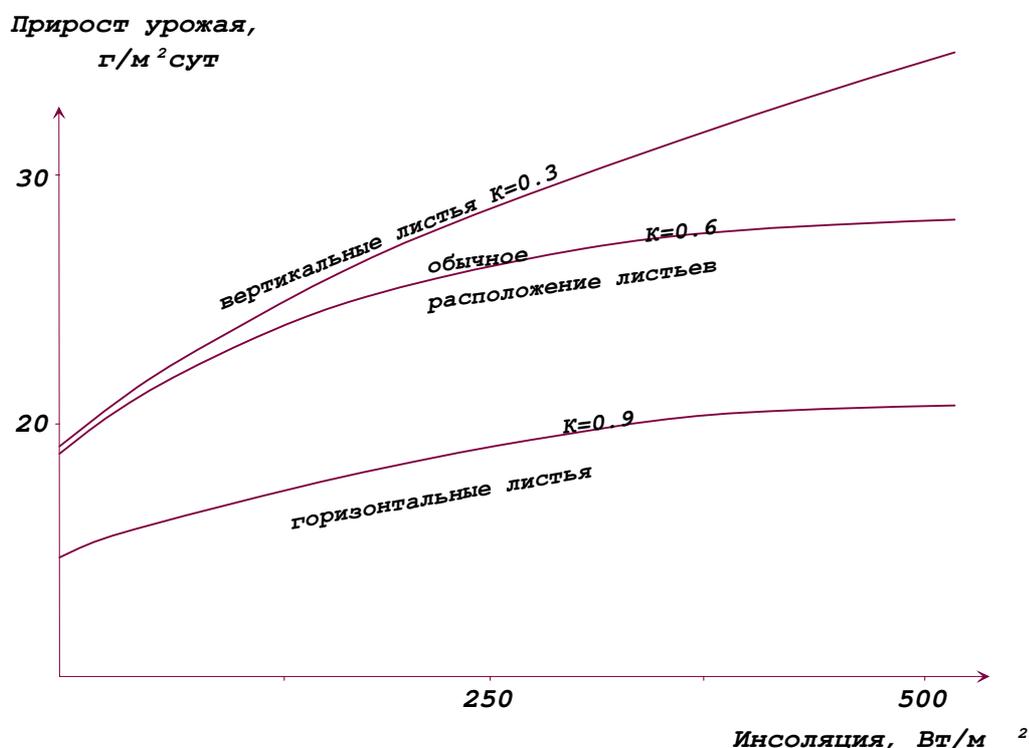


Рис. 30. Зависимость урожая от расположения листьев (коэффициента поглощения, K)

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. 31, 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).

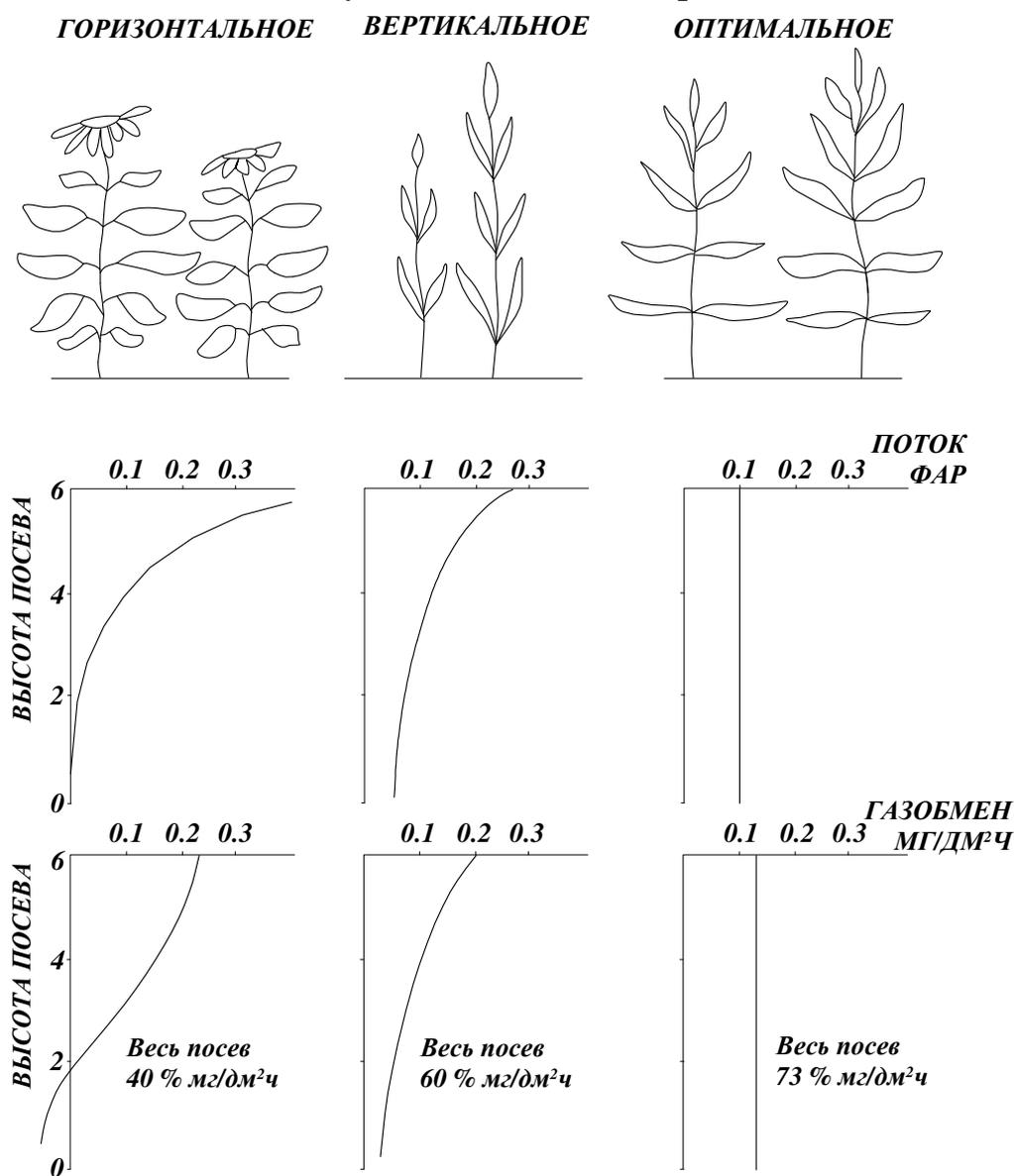


Рис. 31. Распределение потока ФАР и интенсивности газообмена листьев в посевах в зависимости от архитектуры посева (по Х.Т.Тоомингу, 1977)

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 по-

верхностью угол, близкий к перпендикулярному. Поэтому, может оказаться так, что боковые наклонные солнечные лучи могут быть наиболее эффективны (рис. 32, а.).

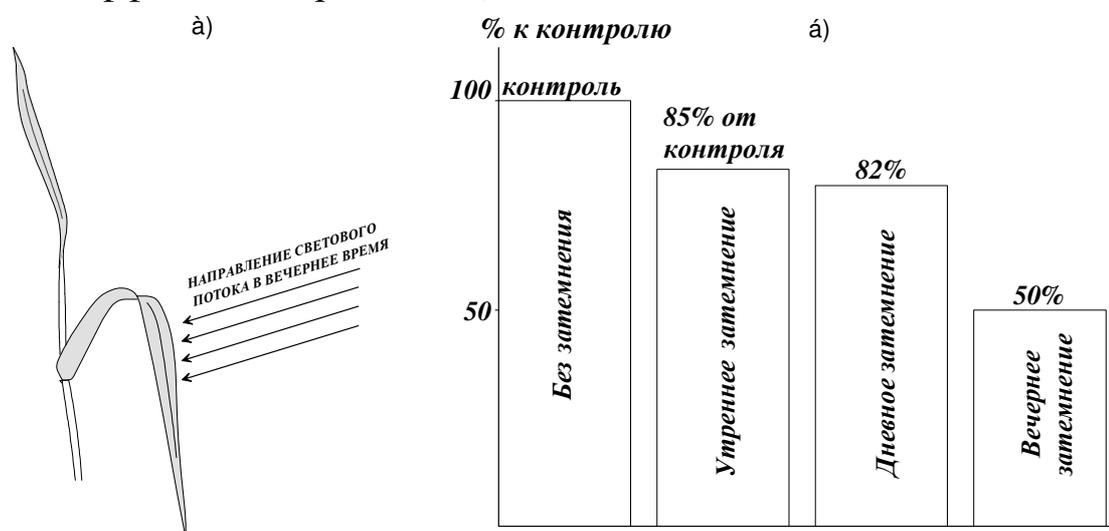


Рис. 32. Схема расположения листа злаков к направлению светового потока (а) и результаты опыта Б.С.Мошкова по влиянию утреннего, дневного и вечернего света (б)

Это положение доказывает классический опыт известного агрофизика, основателя школы агрофизики света и растений, Б.С.Мошкова. 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. 32, б

Как видно из приведенного рисунка 32 (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 вверху, 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.

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. 33 (рис. 33, по Jurik et al) хорошо это подтверждают. Однако, мы хорошо помним, что фотосинтез зависит от освещенности в виде куполообразной функции, имеющей оптимум области мощности светового потока в диапазоне 500-800 Вт/м², что близко к солнечному полуденному освещению.

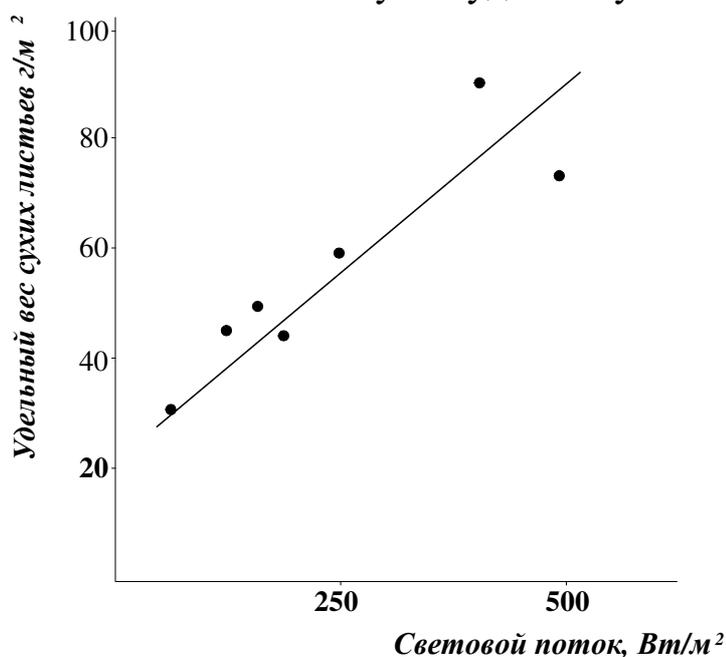


Рис. 33. Зависимость удельного веса сухих листьев (г/м²) растений *Fragaria virginata* от интенсивности светового потока (по Jurik et al, 1979)

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. 34), особенно при высоких значениях интенсивности света.

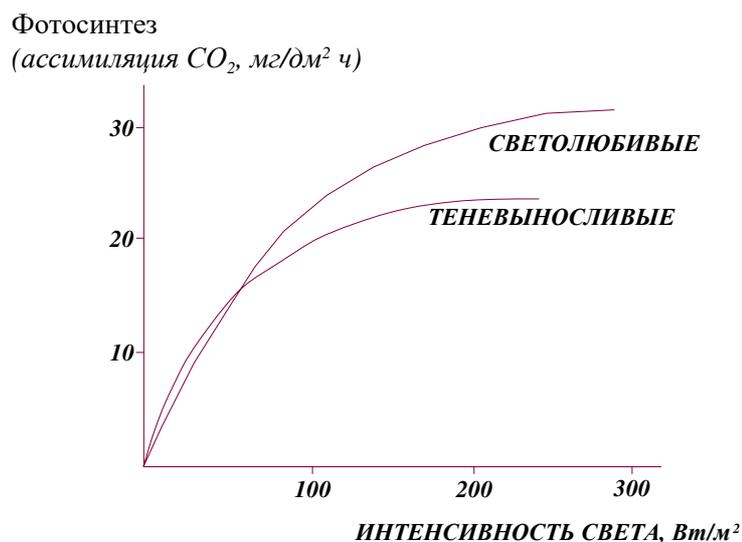


Рис. 34. Световая кривая фотосинтеза для светолюбивых и теневыносливых растений

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.

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» ($A_{уд_л}$). Однако, этот эффект меньшего значения, чем эффект возрастания удельной площади листьев, т.е. отношения площади листьев к массе листового материала ($A_{уд_л}$). 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 разнообразнейшие 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 10.

Таблица 10

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), $г \cdot м^{-2} \cdot нед^{-1} \cdot 10^{-3}$	теневыносливые	61	52	31	20	12
	тенечувствительные	68	55	29	20	5
Относительная скорость роста, $г \cdot г^{-1} \cdot нед^{-1}$	теневыносливые	0,80	0,93	0,73	0,64	0,43
	тенечувствительные	1,10	1,01	0,63	0,37	0,09
Удельная площадь листьев ($A_{уд_л}$), $м^2 \cdot г^{-1} \cdot 10^{-3}$	теневыносливые	32	43	53	71	80
	тенечувствительные	26	32	43	41	36
Удельная масса листьев ($A_{уд}$) $г \cdot г^{-1}$	теневыносливые	0,41	0,43	0,44	0,45	0,45
	тенечувствительные	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 растениях.

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, регулирующих 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, морозостойкость 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.

Глава 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». 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

Начнем рассмотрение этих процессов с момента, когда семя падает 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. 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 (табл. 11).

Таблица 11

«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

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 coleoptile и зародышевые корни. Из coleoptile, 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 coleoptile, 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 (ΔM) агроценоза можно определить как разность между суммарным фотосинтезом и затратами на дыхание

$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \Phi - R$, где ΔM - увеличение биомассы за время t , а Φ и R – 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

$$\frac{dM}{dt} = \varepsilon(\bar{\Phi} - \bar{R}),$$

где $\bar{\Phi}$ - суммарный фотосинтез растения, \bar{R} - суммарное дыхание, ε - коэффициент перехода от массы усвоенной CO_2 к сухой биомассе. Этот коэффициент может иметь строго определенные значения. Если рассматривать в виде первичных продуктов фотосинтеза углеводы, то ε в этом случае будет составлять величину 0,67 (г сухой массы/г CO_2). В каждом конкретном случае следовало найти величину ε , 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):

$$M - m = fPt - \alpha P_1 t_1,$$

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, α - 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, в большинстве современных подходов фитомасса представляется в виде двух составляющих – структурной и запасной (резервной). Запасы образуются в виде углеводов, а структурная био-

масса – 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 через разросшиеся корни из почвы. 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 образуются 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 (ΔM). Можно также использовать и относительный прирост ($\Delta M/M$), 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, находящиеся 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» ($A_{уд_м}$), как отношение площади листьев к биомассе всего растения: $A_{уд_м} = A/M$. Этот показатель действительно характеризует фотосинтетическую работу листового аппарата, и чем он меньше, тем эффективнее работает фотосинтетический аппарат растения.

3. Удельная площадь листьев ($A_{уд_л}$), как отношение площади листьев к массе листового материала, (M_l).

4. Удельная масса листьев ($A_{уд}$), как отношение массы листьев (M_l) 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: $A_{уд_м} = (A_{уд_л}) \times (A_{уд})$. 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 ($\Delta M/M$) 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 пока-

зателем эффективности накопления веществ растением и учитывает разницу двух процессов – фотосинтеза и дыхания в величине ΔM . 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/м² неделю, сосна – 9–12, лиственница – 4–5 г/м² 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. 34 представлена динамика этого показателя для двух различных древесных культур.

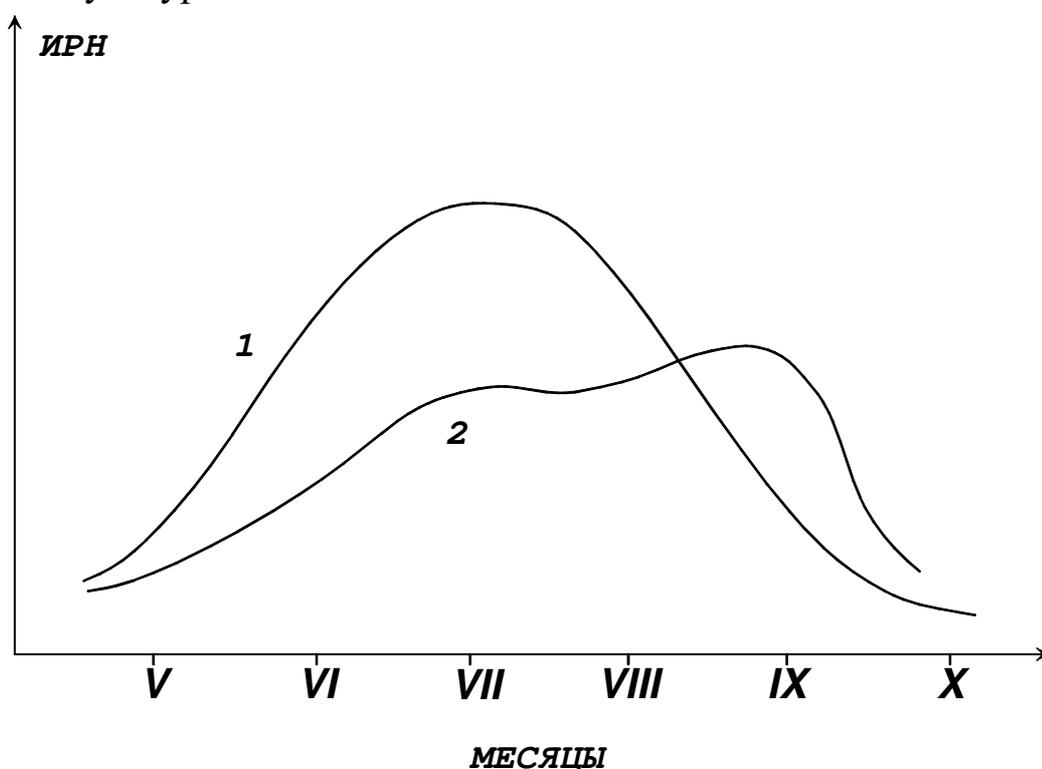


Рис. 34. Динамика индекса результирующего накопления (ИРН, г/м² неделю) в течение вегетационного сезона для интенсивно вегетирующих растений без фазы оттока ассимилянтов в корни (1) и в случае осеннего оттока ассимилянтов в подземные органы при заметном увеличении их биомассы (2)

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*.

Для того чтобы ориентироваться в сравнительном использовании указанных параметров, уметь получать информацию из приведенных величин, рассмотрим один пример, взятый из лесоводства. В табл. 12 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 лиственниц). 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.

Таблица 12

Основные показатели роста развития некоторых 4-летних древесных культур

Древесные породы	Биомасса, M , кг	Площадь листьев, A , $см^2$	Абс. прирост, ΔM , кг	Отн. прирост, $\Delta M / M$, %	<i>ИРН</i> , $г/см^2$ 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:

(относительная скорость роста, $\frac{\Delta M}{M \cdot \Delta t}$) = (индекс результирующего накопления, *ИРН*) x (листовое массовое отношение, $A_{уд_м}$)

или

(относительная скорость роста, $\frac{\Delta M}{M \cdot \Delta t}$) = (индекс результирующего накопления, *ИРН*) x (удельная площадь листьев, $A_{уд_л}$) x (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}*. 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 (NPK)– 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 воздуходержание и пр. Так и в случае роста возможно представить условия практически реализуемых условий роста растений в период их развития. Такой пример приведен на рис. 35.

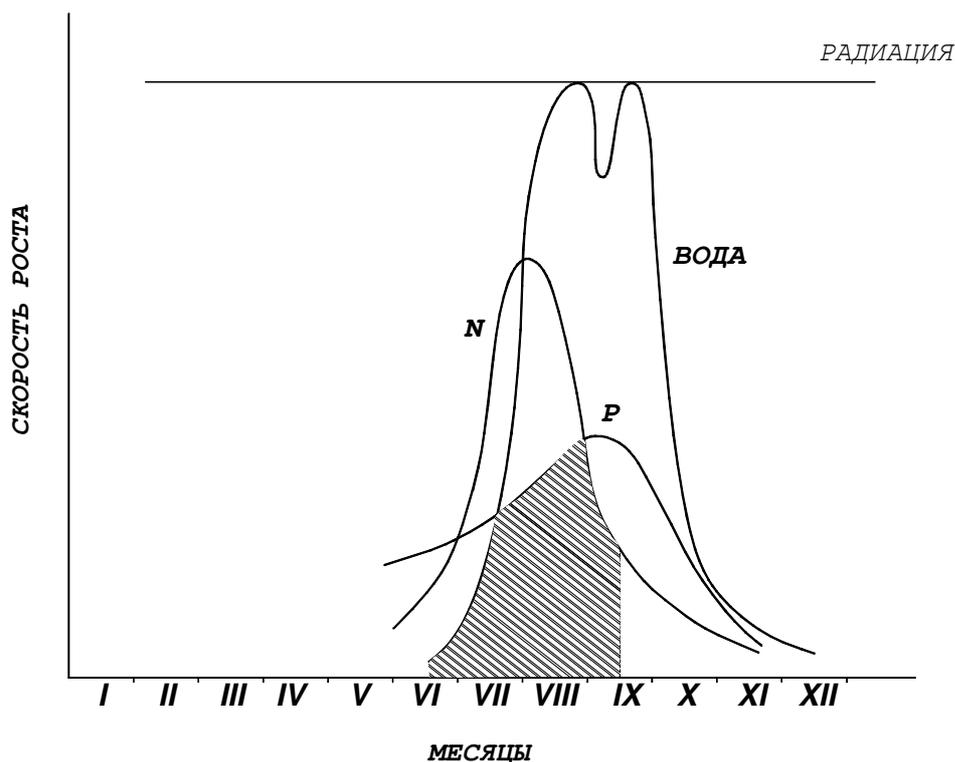


Рис. 35. Рост растений при относительной обеспеченности основными факторами окружающей среды в процессе вегетации (по К.Т. де Виту, 1986).

Заштрихованная область – фактически реализуемые условия роста, не заштрихованная под линией радиации – зона потенциального роста

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 находящие 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 орга-

нов. 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.)

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. 36.

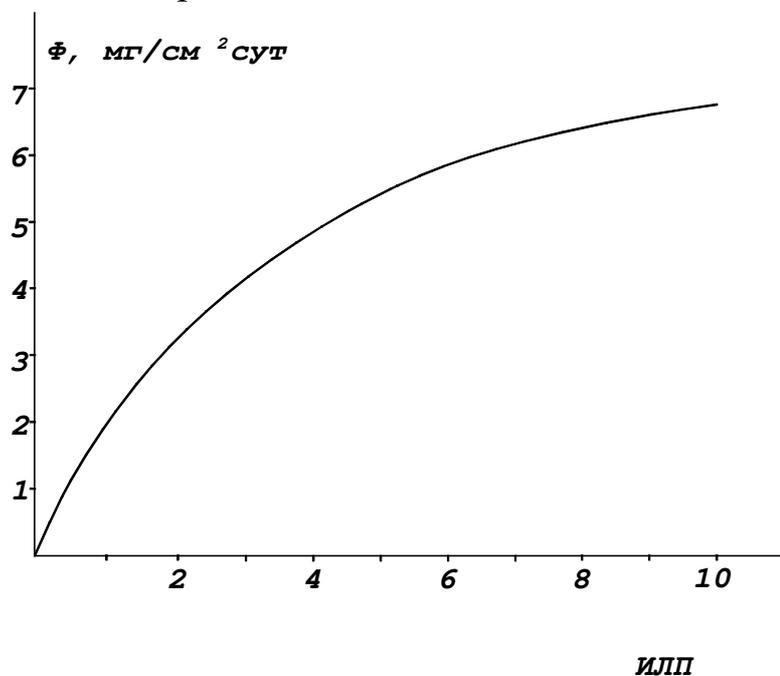


Рис. 36. Зависимость суммарного фотосинтеза (Φ) агроценоза от его листовой поверхности (ИЛП). По О.Л.Сиротенко, 1981

Однозначность и устойчивый вид этой зависимости указывает на то, что для оценки суммарного фотосинтеза агроценоза может быть использован листовой индекс.

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. 37 приведены температурные кривые синтеза крахмала в клубнях картофеля сорта Лорх при изменении температуры в дневных и ночных условиях.

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».

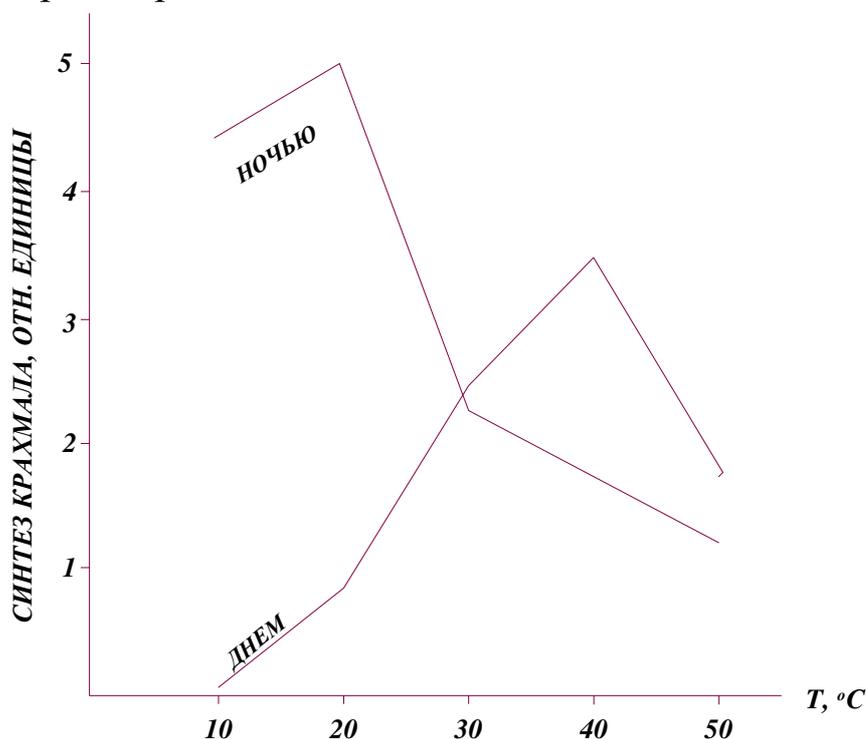


Рис. 37. «Дневные» и «ночные» температурные кривые синтеза крахмала в клубнях картофеля (по Б.А.Рубину, 1959)

Поэтому, так и сложилось в ходе эволюции, что в «дневных» условиях, с их повышенными температурами, эти ферментные расте-

ния «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 соответствии с этим принципом будет складываться и соотношение побег/корень. В течение вегетационного периода соотношение абсолютных скоростей роста побегов и корней схематически представлено на рис. 38. 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. Закачивается вегетационный цикл развития растений.

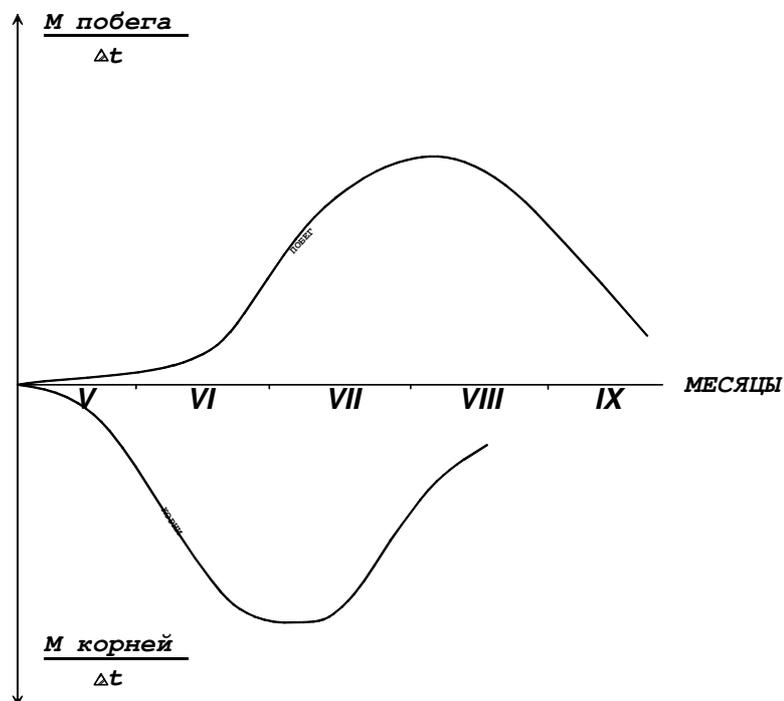


Рис. 38. Динамика абсолютной скорости роста ($\frac{\Delta M}{\Delta t}$) надземной (1) и подземной (2) биомасс

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 уменьшится, 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 (рис. 39), это приведет к стимуляции роста побега. И, напротив, на бедных, неудобренных почвах, в периоды водного дефицита, тогда, когда развитие надземной биомассы лимитируется количеством поступающих-

ся их корней веществ, порезка корней приведет к стремительному снижению роста надземной биомассы.

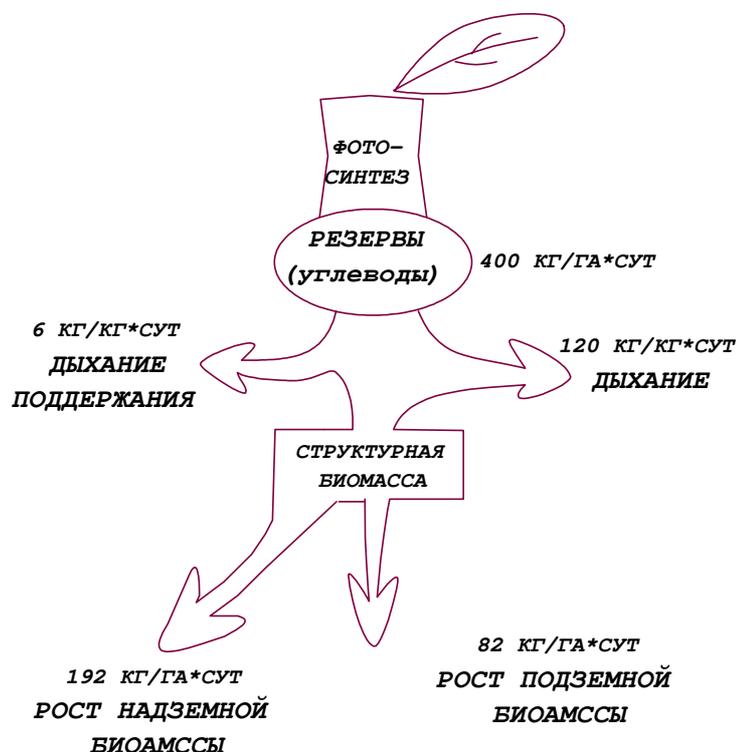


Рис. 39. Схема распределения продуктов фотосинтеза на процессы дыхания и создание структурной биомассы

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:

Определение

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.

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. 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 раз-

растание 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. 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. 40 подтверждает это положение. Резкое снижение длины корней наблюдается при величинах сопротивления пенетрации около 3 атм.

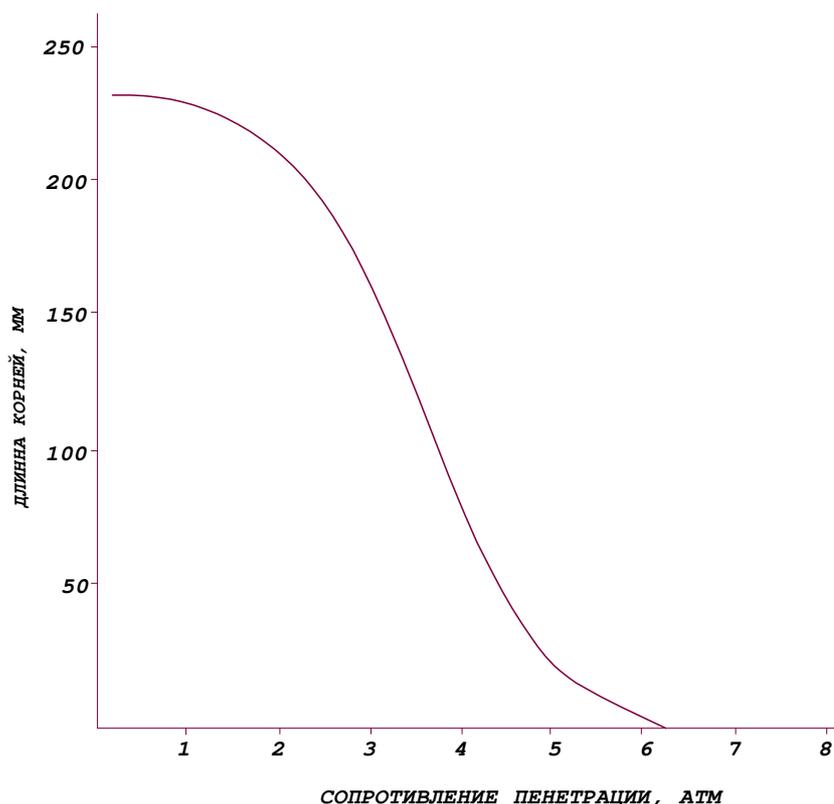


Рис. 40. Влияние сопротивления пенетрации (Р , атм) на длину корней овса (мм). По данным Барлей, Barley, 1962 (цит. по Pearson, 1981)

Кажется парадоксальным, что общепринятой величиной сопротивления пенетрации почвы является значение 3 МПа (что составляет около 30 атм. 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 которые 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 25⁰С. А вот сами вегетационные сосуды с почвой и подземной частью рас-

тений находились в различных температурных условиях: для различных вариантов опыта температура подземной части варьировала от 12 до 35⁰C. В результате опыта оказалось, что максимум отношения побег/корень наблюдается при температуре около 29⁰C, 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. 41 изменение отношение «побег/корень» как раз и указывает на то, что по мере роста температур от 15 до 29⁰C надземная часть растет все интенсивнее.

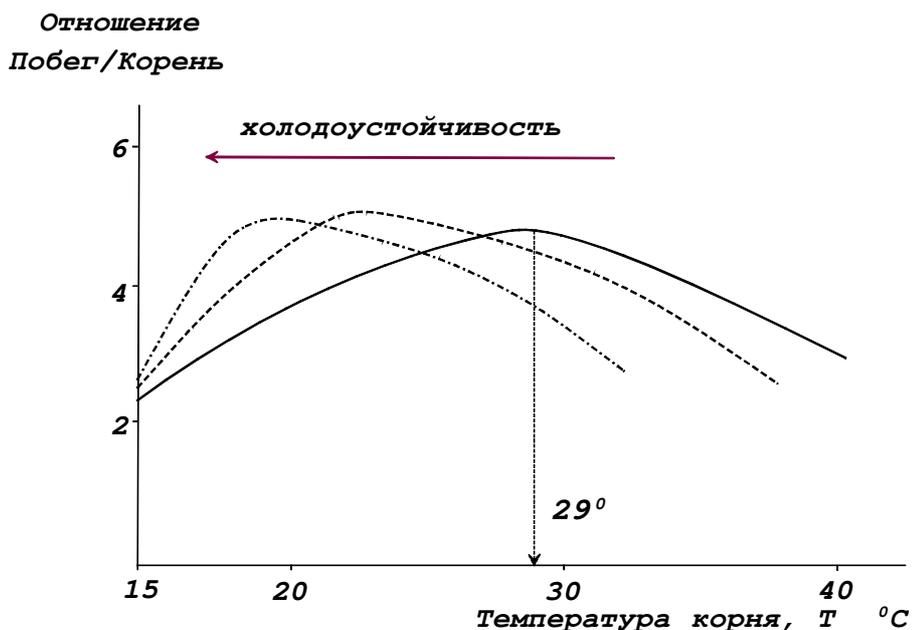


Рис. 41. Зависимость отношения побег/корень от температуры почвы. Пунктирными линиями обозначены более адаптированные к холоду виды (по Барбер, 1988)

При температуре 29⁰C 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.

- **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 Трoutона (Troughton, 1991) 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, 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 из-

бытка 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, 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.

- **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 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, верхо-

водки и др.), то и содержание CO_2 в этом ограниченном объеме воздухоносного порового пространства будет повышаться (корни-то все равно дышат и выделяют CO_2 ; сумма же содержаний O_2 и CO_2 достаточно стабильна и близка к 21%). И при достижении концентрации 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 анаэробии и на повышение концентрации 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 H^+ -ионов в тканях растений, так и косвенно, через увеличения подвижности ионов Al . На прямое воздействие указывают нечасто. Наиболее распространена гипотеза о токсичном воздействии рН через увеличение подвижности ионов Al и 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 42, 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.

Но следует учитывать и то, что изменение рН связано и с токсическим воздействием ионов Al и Mn , которые появляются при понижении рН.

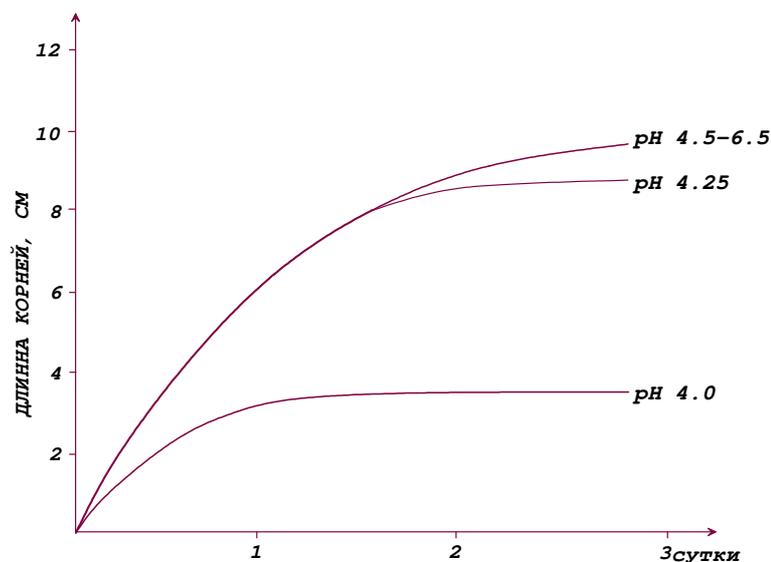


Рис. 42. Динамика роста корней растений, выращенных в водной культуре, при различных pH (по В.В.Парсон, 1981)

Алюминий. Ионы 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 Al связывают с резким уменьшением потребления фосфора. Ионы Al способны образовывать сложные плохо растворимые комплексы с P. Это снижает почвенную доступность P и иммобилизует P в тканях корней растений. А как отмечено выше, именно P 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 мно-

гие другие проявляющие в таких почвах токсичные элементы. Собственно же максимальная концентрация или критический уровень иона Mn составляет 10 ppm.

Недостаток Ca. В случае промывных условий, при низких рН, или в некоторых специфических условиях засоления в почве может наблюдаться недостаток такого макроэлемента, как Ca. Его отсутствие проявляется не само по себе, а лишь в отношении к сумме присутствующих в почвенном растворе катионов. На рис. 43 представлена зависимость относительной длины корней от соотношения Ca к сумме катионов.

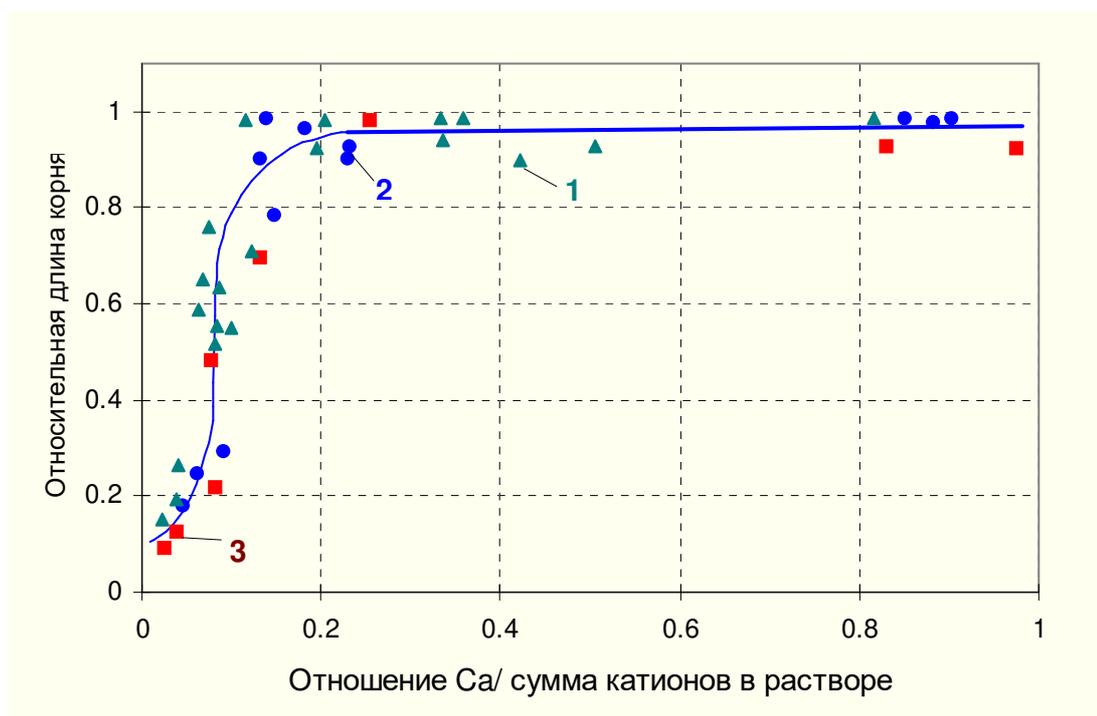


Рис. 43. Зависимость относительной длины корня от соотношения содержаний Ca к сумме катионов в почвенном растворе (Ca/Σ катионов). (По Pearson, 1981)

Если это отношение очень мало, то корни оказываются чувствительными к недостатку иона Ca 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 Ca растворы, которые в почвах встречаются чрезвычайно редко.

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 устья 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. 44, где в виде потоковой диаграммы представлены эти основные процессы в растении.

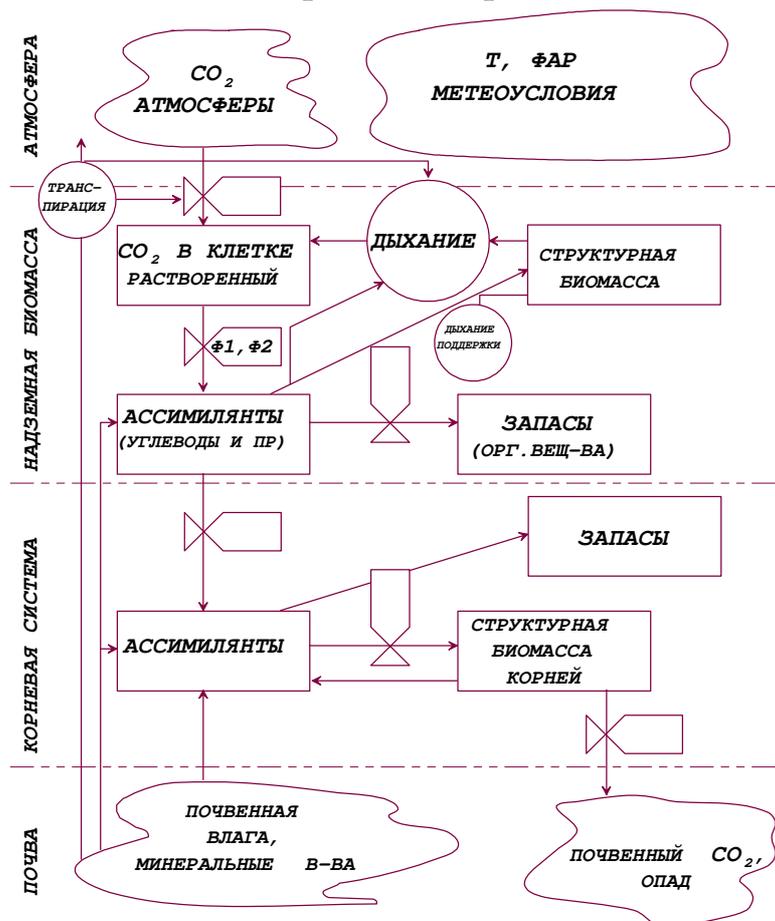


Рис. 44. Поточковая диаграмма формирования продуктивности при безлимитном поступлении минеральных биофильных веществ

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} :

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{Tr}{K_{Tp}}$$

где Tr – транспирация растений, K_{Tp} – транспирационный коэффициент. А вот K_{Tp} 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. 44, 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 вещества (M_c) с транспирацией (Tr) и потенциальным испарением (E_0) через некоторый коэффициент (f), характеризующий прирост сухого вещества:

$M_c = f \frac{Tp}{E_0}$, где f – коэффициент прироста сухого вещества, [кг/(га

сут)]. 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, 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.

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 биопродуктивности 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 белковым азотом. 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 азот 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.

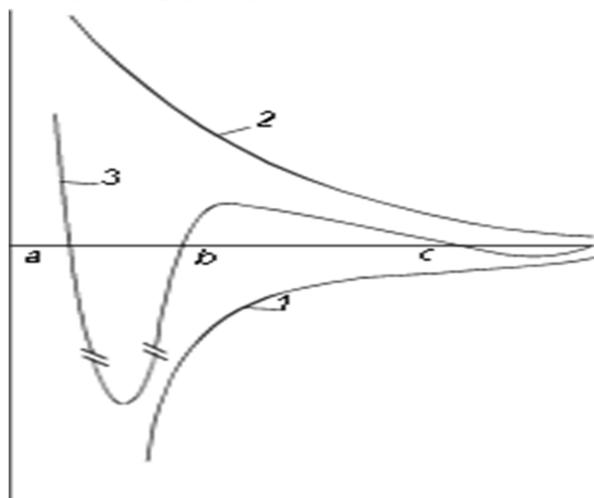
Раздел 2. РЕОЛОГИЯ ПОЧВ

Реология – наука о течении и деформациях материальных тел. Заметим, именно всех материальных тел, не только жидкостей. В конечном счете даже кристаллические породы, такие как базальт, гранит и проч., под действием механических воздействий тоже изменяют свою форму, «текут». Ко всем природным телам применимы основные понятия и законы реологии. В том числе и к почве – сухой, влажной, насыщенной водой, в любом ее состоянии. Течение дисперсного почвенного тела, конечно же, будет иметь свои особенности, связанные прежде всего с тем, что при деформировании почвы почвенные частицы (ЭПЧ, микроагрегаты, агрегаты) будут взаимодействовать, тереться друг о друга. Поэтому большое значение будут иметь форма и наличие влаги вокруг частиц, которая может играть роль определенной «смазки». Кроме того, на взаимоположение почвенных частиц основное влияние будут оказывать связи между этими частицами.

Глава 1. ТИПЫ СВЯЗЕЙ И СТРУКТУР МЕЖЧАСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Кратко остановимся на основных типах связей и контактов между частицами. Рассмотрим сначала распределение сил притяжения и отталкивания между частицами. Не будем рассматривать природу этих сил, а воспользуемся понятиями «притяжение» и «отталкивание» как некими суммарными.

отталкивание



притяжение

Рис. 45. Формирование «ближнего» (сильного, зона a–b) и «дальнего» (слабого, c) максимумов притяжения между дисперсными частицами (по Сергееву, 1971)

Соотношение этих сил представлено на рис. 45. Нетрудно заметить, что по расстоянию от поверхности частицы (l) эти суммарные силы распределяются неодинаково. Силы отталкивания (кривая 2) убывают по экспоненциальному закону, а силы притяжения (кривая 1) – по закону, близкому к степенному. Различный характер распределения этих двух сил обуславливает формирование некоторых локальных максимумов притяжения между частицами. Это заметно по кривой, представляющей разность сил притяжения и отталкивания (кривая 3).

На определенном расстоянии от поверхности частиц, изображенном на графике отрезком ab , располагается ближний и самый большой максимум сил притяжения – так называемый 1-й потенциальный максимум притяжения. Имеется и 2-й максимум притяжения, расположенный далеко от поверхности частиц – это 2-й дальнедействующий максимум притяжения (точка c). Соответственно если между частицами формируются связи за счет 1-го потенциального максимума, то формируются прочные, чрезвычайно устойчивые образования из отдельных частиц. Если же частицы образовали некоторую структуру за счет дальнедействующих сил притяжения, эта структура будет рыхлой, плохо агрегированной. Таким образом, взаимодействие частиц по типам «ближнего» или «дальнего» максимумов притяжения формирует соответствующие структурные образования. Это первый принцип оценки подверженности почвы реологическим явлениям.

Кроме энергии притяжения, безусловно, на характер движения частиц друг относительно друга будет влиять и тип контактов. В основном различают три типа контактов. Это коагуляционные, кристаллизационные и смешанного типа.

На схеме (рис. 46, а) представлено образование *коагуляционных контактов*, которые определяются наличием межчастичных пленок воды. Эти контакты позволяют частицам достаточно свободно двигаться друг относительно друга, формировать временные неустойчивые структуры, восстанавливаться после механического воздействия. Впрочем, если эти контакты образованы ближними силами притяжения, они, безусловно более прочные, лучше структурированы. Их прочность определяется поверхностными силами межмолекулярного взаимодействия.

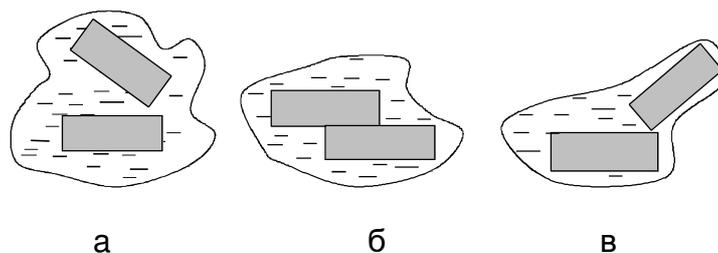


Рис. 46. Схема образования различных типов межчастичных контактов: а – коагуляционного типа; б – кристаллизационного; в – смешанного типа

Контакты кристаллизационные – наиболее прочные контакты между частицами: частицы окружены общей пленкой воды, имеется заметная площадь контакта между двумя частицами, частицы практически неподвижны друг относительно друга (рис. 46, б). Такие системы будут прочными, слабонабухающими, устойчивыми к внешним нагрузкам.

И, наконец, *контакты смешанного типа*, представленные на рис. 46, в, занимают промежуточное положение, частицы лишь ограниченно подвижны друг относительно друга. Конечно, в реальных почвах представлены все три типа контактов преимущественно смешанного типа. В зависимости от гранулометрического состава, минералогического состава, состава органического вещества и других факторов доминируют те или иные. Оценка типа контактов – это второй принцип оценки реологического поведения почв.

Кроме того, на реологическое поведение будет оказывать влияние и форма частиц. Могут встречаться частицы весьма разнообразной формы, и электронные фотографии подтверждают это. Если частицы имеют игольчатую форму, то они способны формировать различные ячеистые структуры и поведение их будет весьма специфичным. А круглые частицы при боковом воздействии (сдвиге) способны «катиться» друг относительно друга. Поведение такого природного тела будет совсем иным, чем состоящего из игольчатых частиц. Именно с формой частиц во многом связаны такие явления, как тиксотропия, дилатансия и др., о которых речь пойдет ниже.

Итак, для характеристики реологического поведения природных объектов необходимо иметь в виду три принципиальных момента:

- энергию притяжения, формирующую межчастичную связь: дальние или ближние силы взаимодействия;

- тип межчастичного контакта: коагуляционный, кристаллизационный, смешанный;
- форму частиц.

Реология, кроме того, что пользуется понятиями межчастичных взаимодействий, использует и классические законы течения материальных тел. Для их описания необходимы количественные критерии, или основные реологические характеристики материальных тел.

Глава 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Деформация – это относительное смещение точек системы, при котором не нарушается ее сплошность. Почвенные деформации – это относительное смещение частиц твердой фазы (ЭПЧ, микро-, макроагрегатов), при котором не нарушается сплошность почвенной массы.

Деформация разделяется на различные виды: упругие и пластические, которые в свою очередь разделяются на объемные (растяжения и сжатия) и деформации сдвига.

Упругая деформация – исчезает после снятия нагрузки. Упругость – свойство материальных тел восстанавливать свою форму и объем после прекращения действия внешних сил.

Остаточная деформация – необратимая, изменения остаются и после снятия нагрузки. Если тело не разрушается, не происходит нарушения связей, – это деформация пластическая (от греч. «пластос» – лепимость). Соответственно *пластичность* – свойство материальных тел в определенных пределах претерпевать пластические деформации, необратимо деформироваться под действием внешней нагрузки.

Вязкость (внутреннее трение) – свойство материальных тел (в основном жидких) при их течении сопротивляться действию внешних сил. При описании деформации указывается напряжение, вызывающее деформации, обозначаемое и использующее единицы, аналогично давлению [Па, атм и пр.]. Различают две составляющие напряжений – нормальное, которое действует перпендикулярно поверхности, – P_σ и, когда речь идет о сдвигающих давлениях, тангенциальное – P_τ . Нормальное вызывает деформации растяжения и сжатия, а тангенциальное – сдвиг (рис. 47).

Для описания деформаций почв используют количественные параметры деформаций, описывающие изменения порового пространства почв.

Для характеристики процесса уплотнения под действием внешней силы, перпендикулярной к поверхности образца (P_σ), можно пользоваться величиной осадки или уплотнения почвы процента (доли) изменения линейных или объемных $l_p = \frac{l_0 - l}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$ или $\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_0}$ [%], где l и l_0 , V и V_0 – измененная и начальная длина (высота), объем почвенного образца (рис 47 а). Иногда используют модуль осадки – величину, аналогичную осадке или уплотнению, e – это величина уменьшения длины (Δl , мм) образца исходной высотой (l_0) в 1 м при приложении дополнительной нагрузки $e = 1000 \frac{\Delta l}{l_0}$ [мм/м].

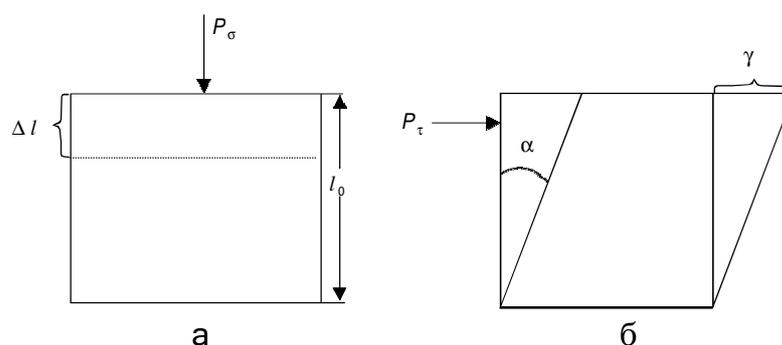


Рис. 47. Схема возникновения деформаций сжатия (а) и сдвига (б)

Коэффициент пористости e есть отношение объёма пор к объёму твёрдой фазы почвы $e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{тв. фазы}}}$, или, если использовать традиционное для физики понятие пористости ε , то $e = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{ps - pb}{pb}$.

Коэффициент пористости является более физически обоснованным параметром при оценке деформаций, чем традиционная пористость, так как в процессе деформаций необходимо относить все линейные или объемные изменения к независящему от этих воздействий неизменному объёму. А этот объём – объём твердой фазы. Только в этом случае возможен сравнительный анализ деформационных явлений: при постоянстве знаменателя в выражении коэффициента $e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{тв. фазы}}}$. Поэтому в данном разделе будем пользоваться коэффициентом пористости.

$$\Phi = \frac{1}{pb} - \frac{1}{ps} \text{ [см}^3\text{/Г]},$$

или, для почвенных агрегатов, удельный объем пор агрегатов:

$$D = \frac{1}{p_a} - \frac{1}{p_s} [\text{см}^3/\text{Г}],$$

где p_s , p_b , p_a – плотности твердой фазы почвы, почвы и агрегата. Соотношения между различными выражениями объема пор при деформациях – коэффициентом пористости (безразмерный или $\text{см}^3/\text{см}^3$), удельным объемом пор почвы Φ [$\text{см}^3/\text{Г}$], с традиционным для почвоведов выражением в виде порозности [$\text{см}^3/\text{см}^3$] выглядят следующим образом:

$$\Phi = \frac{e}{p_s} \text{ и } \Phi = \frac{\varepsilon}{p_b}.$$

Деформации сдвига, в том числе упругие, характеризуются относительными величинами – *тангенсом угла сдвига* ($\text{tg } \alpha$), *сдвигом* (γ) и *скоростью сдвига или скоростью деформации* $\gamma = d\gamma / dt$, где t – время. Эти величины можно проиллюстрировать на схеме (рис. 47, б), где первоначальный прямоугольный образец с закрепленным основанием под действием сдвигающего давления P_i изменяет свою форму, приобретая форму параллелограмма. При этом верхняя часть образца сдвигается на величину γ (сдвиг) и отклоняется от первоначально прямого угла на угол α (рис. 47, б). Важно то, что при деформациях сдвига происходят изменение формы и трение слоев объекта друг о друга.

Указанные основные виды и параметры деформаций лежат в основе и так называемых реологических законов для идеальных систем – законов для идеально упругого, вязкого и пластичного тел – основных законов механики, которые используются в почвенной реологии.

Реология – наука о течении и деформациях материальных тел.

Деформация – относительное смещение точек системы, при котором не нарушается ее сплошность. *Упругая деформация* – обратима, почва восстанавливает свою форму и объем после прекращения действия внешних сил. *Остаточная деформация* – необратима, изменения остаются и после снятия нагрузки.

Пластичность – свойство почв в определенных пределах претерпевать пластические деформации, необратимо деформироваться под действием внешней нагрузки без потери сплошности.

Вязкость – свойство почв (в основном насыщенных влагой паст) при их течении сопротивляться действию внешних сил.

Деформации определяются внешними давлениями/напряжениями (нормальным и тангенциальным) и внутренними свойствами почв, прежде всего энергией межчастичных связей, типом контакта и формой частиц.

Основные параметры деформаций:

Напряжения – сжатия или растяжения – действует перпендикулярно поверхности, P_σ [Па, атм.]; сдвига – действует под углом к поверхности материального тела, тангенциальное напряжение – P_τ .

Изменения порового пространства почв при деформациях:

Коэффициент пористости e есть отношение объема пор к объему твердой фазы почвы: $e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{ТВ.фазы}}}$ связанный с пористостью (ε), плотностью почвы (p_b) и твердой фазы (p_s):

$$e = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} = \frac{p_s - p_b}{p_b}$$

Осадка или уплотнение почвы под действием напряжения сжатия – процент (доля) изменения линейных или объемных характеристик почвы: $l_p = \frac{l_0 - l}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$ или $\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_0}$ [%], где l и l_0 , V и V_0 – измененная и начальная длина (высота), объем почвенного образца.

Тангенс угла сдвига ($\tan \alpha$), сдвиг (γ) и скорость сдвига или скорость деформации $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ – время для характеристики деформаций сдвига, в том числе упругих.

Глава 3. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ДЛЯ ИДЕАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Реология является классическим примером науки, которая обязана своим развитием точной формулировке изначальных чисто научных образов – идеальных моделей. Как термодинамика для своего развития потребовала введения понятия «идеального газа», точно так же и реология ввела ряд идеальных моделей, описывающих идеальные примеры упругости, пластичности и вязкости. Математические законы, лежащие в основе описания этих идеальных образов, получили имена авторов этих реологических законов.

- *Идеально упругое тело – закон Гука.*

При воздействии на тело напряжения P происходит полностью обратимое сжатие или сдвиг части тела на величину Δl (рис.48). Эта деформация полностью обратимая, поэтому схематически это идеальное тело изображается в виде пружины.

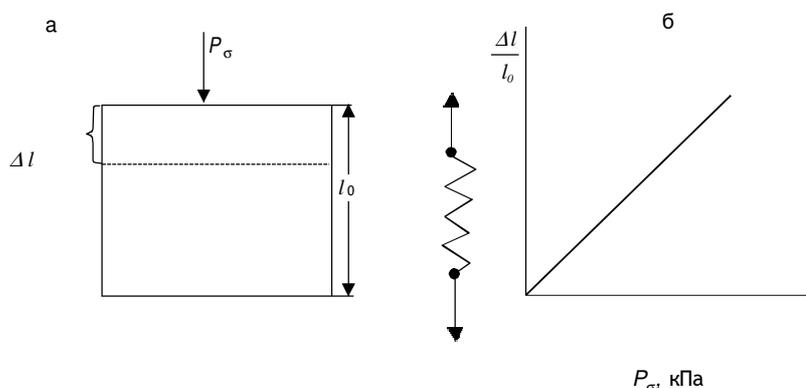


Рис. 48. Модель идеально упругого тела – «пружина» и график зависимости деформаций от напряжения

Для идеально упругого тела справедливы соотношения:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{P\sigma}{E}$$

где $\Delta l/l_0$ – уплотнение; $P\sigma$ –напряжение сжатия; E – модуль Юнга, или модуль упругости, отражающий «жесткость» идеально упругого тела. Примером почти идеально упругого тела могут быть и природные объекты, например, кристаллы минералов. Они проявляют только упругие свойства и для них справедлив закон Гука.

- *Идеальное вязкое тело – закон Ньютона.*

Образом для такой идеализации является поршень с отверстиями, к которому приложено напряжение, за счет которого этот поршень и перемещается внутри цилиндра с жидкостью (рис. 49).

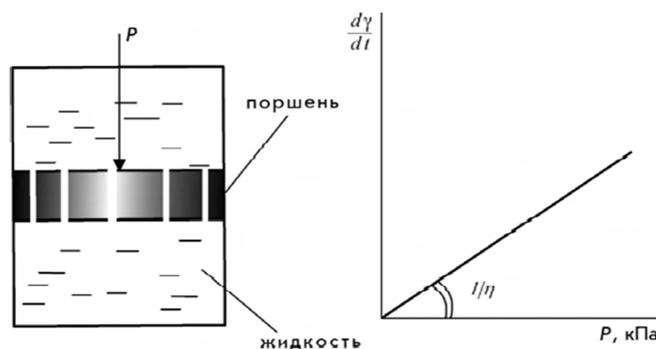


Рис. 49. Модель идеально вязкого тела – «проницаемый поршень» и график зависимости скорости деформаций от напряжения

Для такого тела Ньютон предложил зависимость $P = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma}$ или $P = \eta \dot{\gamma}$, где под коэффициентом пропорциональности обозначена величина вязкости η . Как видно из этого уравнения, вязкость есть отношение приложенного напряжения к скорости деформации. Размерность этой величины [Па·с], варьирует она для природных объектов от 10^{-3} (вода, некоторые суспензии) до 10^{15} Па·с (горные породы).

• *Идеально пластичное тело – закон Сен-Венана–Кулона.*

Пластичность – свойство материальных тел необратимо деформироваться под действием внешней нагрузки, т.е. под воздействием внешней силы тело начинает деформироваться, а при прекращении ее действия – деформации моментально прекращаются, а тело сохраняет форму, обретенную при воздействии. Механическим аналогом идеально пластичного тела служит деревянная пластинка, перемещающаяся по горизонтальной тоже деревянной поверхности. Это явление называют «сухим трением» (рис.50). Действительно, если деревянная пластинка лежит на деревянной же поверхности, она неподвижна; аналог – деформаций не происходит. Пластинку пытаются передвинуть, прилагая некоторую силу. Сначала сила мала, пластинка не движется за счет трения; деформаций не происходит. Затем под воздействием некоторых уже значительных сил сила трения пластинка–поверхность преодолевается, и пластинка начинает двигаться; это аналог происходящих деформаций. Если же воздействующую силу убрать, пластинка мгновенно остановится; деформации прекратились. Поэтому в классической механике и про водят аналогию между сухим трением и явлением пластичности материальных тел.

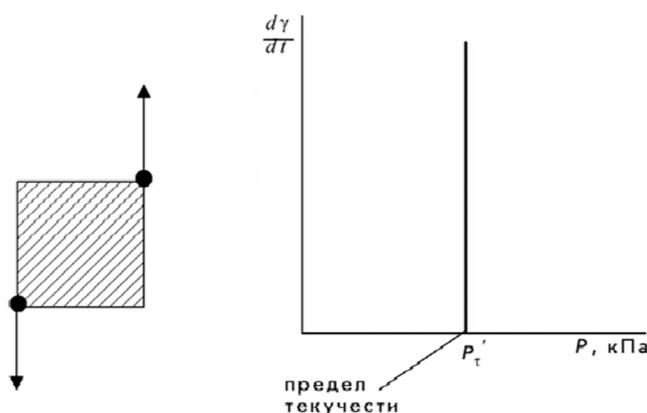


Рис. 50. Модель идеально пластичного тела – «сухое трение» тела о поверхность и график зависимости деформаций от напряжения

Как видно из графика, реологическое поведение этих тел следующее: сначала под воздействием напряжения сдвига ничего с телом не происходит. При достижении некоторой величины P_{\square}' это тело начинает течь и впоследствии течет с любой скоростью. Сама же критическая величина P_i называется пределом текучести.

Комбинация представленных идеальных моделей приводит к большому разнообразию различных реологических законов, описывающих уже тела, близкие к природным объектам. Почвенная реология, почвенная механика и инженерия– науки, изучающие действие сил на почву, начались с публикации в 1925 г. Карлом Терцаги книги по почвенной механике (Erdbaumechanik). В дальнейшем многочисленными экспериментами показано, что почвенные деформации нелинейны, конечны, необратимы. Поэтому приведенные выше идеальные законы, такие соотношения, как модуль Юнга, отношение Пуассона, не являются константными в процессе деформаций почв. А потому и основные уравнения теории пластичности в идеальном виде к почве неприменимы так же, как и сама теория пластичности. Поэтому используются некоторые из специальных моделей, которые близки к поведению почвы при различном ее состоянии.

Глава 4. ОСНОВНЫЕ РЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ К ПОЧВЕ

Вязкопластичное тело (модель Бингама–Шведова)

Начнем с вязкопластичного тела, или с так называемой модели Бингама– Шведова. Комбинируя идеальные образы вязкого и пластичного тел, можно получить следующую схему.

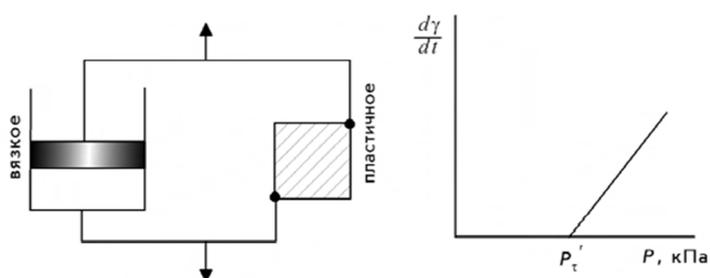


Рис. 51. Модель вязкопластичного тела, модель Бингама–Шведова. Применима для насыщенных и близких к насыщению почвенных паст

Это тело, в отличие от идеально пластичного, течет после некоторой величины P_i , но не с любой скоростью, а с некоторой конкретной, обусловленной вязкостью этого тела. Русский физик Н.Ф. Шведов впервые обнаружил это свойство насыщенных водой дисперсных систем начинать течь после преодоления некоторого предела прочности, «предела Шведова». По всей видимости, такое поведение будет близко к поведению почвенных паст при насыщении их водой, близкому к полному. В таких условиях почвенные пасты «текут» после приложения к ним некоторой силы P_i . Значит, в почве частично разрушаются структурные связи, которые весьма слабы, а пространство между частицами практически полностью заполнено водой («смазкой»). Другие более прочные структурные связи в почве сохраняются, не разрушаются, однако на течение почвенной пасты не оказывают существенного влияния. Наиболее ярко реологическое поведение жидко- и твердообразных тел можно оценить по так называемым реологическим кривым – зависимостям вязкости (иногда скорости деформации) от действующего сдвигающего напряжения. В реологических кривых, подчеркнем, оценивают изменение вязкости эффективной, т.е. величины не постоянной, а зависящей от действующего касательного напряжения. Такая вязкость в отличие от ньютоновской называется эффективной (или бингамовской). На рис. 52 представлена зависимость изменения скорости деформации (а) и эффективной вязкости (б) почвенной пасты от действующей силы.

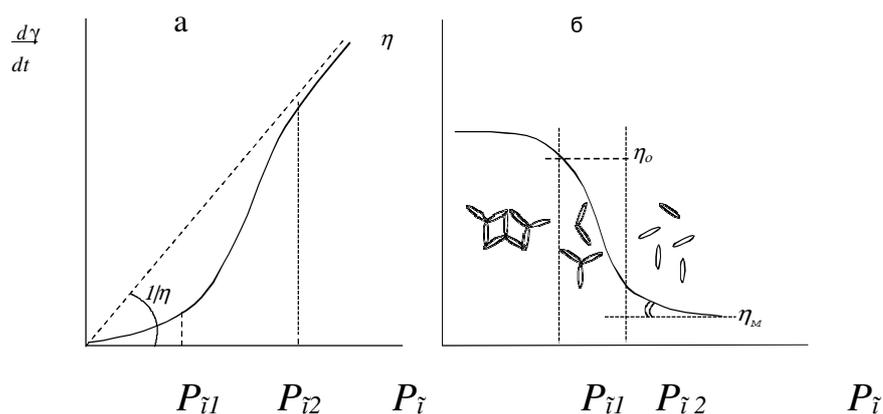


Рис. 52. Реологические кривые: зависимости скорости деформации (а) и эффективной вязкости (η) (б) (указаны почвенные частицы и постепенно разрушающиеся связи от P_{i1} до P_{i2}) от тангенциального напряжения ($P_{\tilde{i}}$) для почвенных паст

На рис. 52, а приведена *реологическая кривая* – зависимость скорости деформации почвенной пасты от напряжения сдвига. Реальная почвенная паста в отличие от ньютоновской жидкости первоначально, при малых напряжениях, имеет высокую вязкость. Однако при увеличении $P_{\dot{\gamma}}$ ее вязкость меняется и течение пасты приближается к ньютоновскому. Более наглядно появление пределов текучести представлено на зависимости вязкости от напряжения (рис. 52, б). Из этого рисунка видно, что для твердообразных тел, к которым относится почва в ненасыщенном, но близком к насыщению состоянии, характерно появление предельного напряжения сдвига, называемого пределом текучести (на рис. 52, а – $P_{\dot{\gamma}1}$). До этого значения сдвигового давления почва проявляет упругие свойства и деформируется обратимо. В почве проявляются межчастичные взаимодействия, не позволяющие ей разрушаться. При достижении некоторой силы, а именно $P_{\dot{\gamma}2}$, наиболее слабые межчастичные взаимодействия нарушаются, почвенная паста начинает течь. Причем вязкость не является постоянной величиной, не подчиняется закону Ньютона, а зависит от приложенного напряжения. Течение тела при нарушенной структуре наблюдается с переменной вязкостью (бингамовская вязкость). В диапазоне напряжений $P_{\dot{\gamma}1} - P_{\dot{\gamma}2}$ вязкость резко снижается, скорость течения пасты увеличивается. Так происходит до величины $P_{\dot{\gamma}2}$, при которой структура линистой пасты полностью разрушается, и течение возобновляется снова при постоянной вязкости (η_m). Значения вязкостей от η_0 до η_m являются переходными. Именно Н.Ф. Шведов и показал, что некоторые дисперсные тела обладают такими пределами, характеризующими поведение структурированных систем: это предельное напряжение $P_{\dot{\gamma}1}$, при котором эффективная вязкость быстро падает и которое получило название «предела Шведова», или предела текучести. При достижении же сдвигового напряжения величины $P_{\dot{\gamma}2}$ межчастичные структурообразующие связи полностью разрушаются. Это минимальное напряжение разрушения, или максимальный предел текучести. Скорость движения паст с разрушенной структурой растет пропорционально внешнему воздействию. Поведение такого рода тел и описывается моделью Бингама – Шведова.

Вязкость структурированных суглинистых систем (почвенных паст в диапазоне влажности, близком к насыщению) величина переменная и при некотором воздействующем напряжении резко снижается за счет разрушения структурных связей, достигая постоянных

значений при минимальном напряжении разрушения или максимальном пределе текучести (P_{i1}).

Зависимости эффективной вязкости от напряжения – *реологические кривые*, на которых определяют характерные величины: напряжения P_{i1} и P_{i2} пределы текучести и максимальный предел текучести, η_0 и η_m максимальная и минимальная эффективные вязкости, отражающие структурные свойства глинистых паст.

Упруго-вязкое тело (модель Барджеса)

Следующим модельным образом, который будет близок к состоянию почвы, уже проявляющей признаки упругости, будет являться упруго-вязкое тело, или модель Барджеса. Для этих условий характерны пластические деформации со слабым упругим моментом. Это состояние почвы, когда почва еще достаточно влажная, она легко формуется; это то состояние, которое почвоведы используют, раскатывая почву в шнур для определения ее гранулометрического состава в полевых условиях.

Упруго-хрупкое тело (модель Пойнтинга–Томпсона)

Если мы и дальше будем иссушать наш образец, который хорошо формовался, «лепился», то он все в большей степени будет приобретать упругие свойства или разламываться на кусочки, становится хрупким, как говорят, консистенция почвы станет полутвердой. Эта модель является особой комбинацией идеальных упругого и вязкого тел и отражает полутвердую консистенцию. По всей видимости, этот образ в определенной мере характеризует реологическое поведение почвы, находящейся в достаточно сухом состоянии, когда отдельные агрегаты проявляют себя как упругие тела, но некоторое количество влаги, видимо пленочной, позволяет частицам медленно двигаться друг относительно друга как в идеально вязком теле.

Относительно последних образов, в какой-то мере отражающих реальные объекты, мы все время подчеркивали, что, видимо, изменение моделей будет происходить при изменении влажности образца. Действительно, для одной и той же почвы, по мере уменьшения влаги, почва будет переходить из одного состояния в другое – из вязкого, пластичного в «пластилинообразное», способное формоваться, и наконец в хрупкое, распадающееся на отдельные фрагменты под действием внешней силы. Каждому из переходов соответствуют определенные почвенные влажности, которые получили название физико-механических констант, или констант Аттерберга.

Глава 5. ПРЕДЕЛЫ АТТЕРБЕРГА

Итак, мы уже знаем два «критических состояния» в реологическом поведении почвы. Это «предел Шведова» и наступление упруго-вязкого состояния. В почвоведении для нахождения этих «критических состояний» используют специальные подходы и величины. По определению «предел Шведова» – это предельное напряжение, после которого почва начинает течь с эффективной вязкостью. В почвоведении же важно знать диапазон влажностей, в котором почва течет. По всей видимости, это будут влажности от пересыщенных паст до некоторых значений влажности, при которых уже не действует модель Шведова, когда начинают проявляться пластические деформации. Таким образом, необходимо знать влажность почвы, при которой почва прекращает течь. Для этого стандартизируют нагрузку (напряжение) и подбирают влажность, при которой почва может изменяться без видимых пластических деформаций. Величина влажности (по аналогии с предельным напряжением сдвига или пределом текучести) называется верхним пределом пластичности, или пределом текучести. Ее наряду с некоторыми другими предложил известный исследователь механических свойств почв Альберт Аттерберг в 1911 г.

При наступлении упруго-вязкого состояния почва деформируется, но уже проявляются, слабо и малозаметно, пластические свойства, слабая «пружинистость» почвенного образца. Это довольно широкий диапазон почвенных условий, когда почва хорошо формуется и не трескается. Для нахождения влажности, при которой начинают проявляться упругие свойства, Аттербергом тоже была предложена почвенно-механическая константа – нижний предел пластичности.

Предел текучести увеличивается с увеличением содержания физической глины, органического вещества, ионной силы раствора и валентности катионов, а также доли смектитовых минералов. Иногда по пределам пластичности рассчитывают число пластичности как разницу влажностей при верхнем и нижнем пределах пластичности.

Эту характеристику используют для оценки вещественного состава почвы, ее гранулометрического состава и пр. В частности, если разница влажностей при верхнем и нижнем пределах пластичности составляет 0–7%, то это супесь, 7–17% – суглинок, >17% – глина. И ведь именно это свойство мы используем в полевых условиях, когда

определяем гранулометрический состав методом скатывания в шнур увлажненной примерно в указанном диапазоне почвы: если «шнур» разламывается – песчаные (нет пластичности), трескается – суглинистые, а сворачивается без трещин – глина (высокое число пластичности).

В почвоведении используют две константы, получивших название физико-механических констант, или *пределов Аттерберга*: *верхний предел пластичности (предел текучести)* – влажность почвы, когда образец течет при стандартной нагрузке. Определяется как влажность почвы, когда конус весом 76 г погружается в почву на 10 мм за конкретное время;

нижний предел пластичности – предельная влажность почвы, при которой она может деформироваться без разломов. Соответствует влажности почвы, при которой образец при раскатывании в шнур диаметром 3 мм начинает распадаться на мелкие кусочки.

Глава 6. ТИКСОТРОПИЯ. РЕОПЕКСИЯ. ПЛЫВУННОСТЬ. ДИЛАТАНСИЯ

Тиксотропия – способность тонкодисперсных насыщенных влагой систем разжижаться под влиянием механического воздействия, а затем, после прекращения воздействия, переходить в прежнее полутвердое (гелеобразное) состояние. Это явление обусловлено прежде всего наличием дальних коагуляционных связей и специфической формой частиц. Такое поведение – разжижение под влиянием механического воздействия и затвердевание в состоянии покоя – становится понятным, если рассмотреть приведенную на рис. 53 схему расположения частиц и иммобилизованной воды в состоянии покоя.

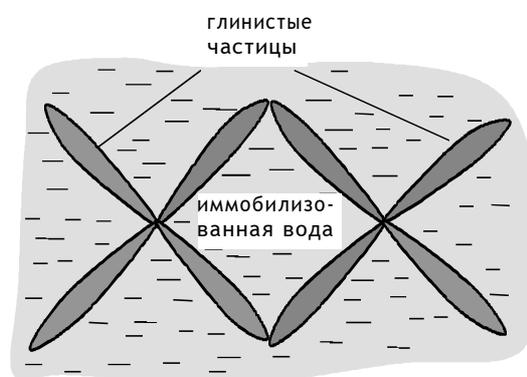


Рис. 53. Схема расположения глинистых почвенных частиц с иммобилизованной водой между ними

В состоянии покоя приведенная на рис. 53 «я ч е и с т а я» структура обладает некоторой прочностью. Но стоит только оказать на такую систему механическое воздействие в виде тряски, вращения, чередующихся ударов и проч., как непрочная структура распадается. Глинистая суспензия начинает течь.

Формирование такой тиксотропной структуры, безусловно, зависит от влажности. Предложен так называемый тиксотропный предел, или предел затвердевания – влажность, при которой грунт теряет способность к тиксотропным изменениям. Для каолинистых глин этот предел достигается при 70–%-ной влажности, а для гидрослюд – при 110 – 170%.

Реопексия – явление, в целом противоположное тиксотропии: возрастание прочности структуры (вязкости) при действии напряжения. Как правило, напряжения сдвига. Оно характерно для глин с частицами палочковидной формы. Направленное механическое воздействие ориентирует частицы друг относительно друга так, что образованная структура становится более прочной.

Плывуность – способность водонасыщенных дисперсных систем переходить в текучее состояние с очень низкой вязкостью при напряжениях выше предела прочности связей между частицами и оставаться в текучем состоянии по прекращении механического воздействия. Существенное отличие от тиксотропии – системы продолжают оставаться в текучем состоянии при прекращении воздействия, т.е. в пывунах отсутствуют тиксотропные свойства (восстановление структуры). А по сути это явление также связано с переходами воды, иммобилизованной в структурных образованиях, в воду свободную, подвижную. А. Ф.Лебедев был одним из основоположников науки о пывунах. Именно он указывал, что «истинный» пывун – это песчаные водонасыщенные образования, содержащие некоторое количество коллоидных частиц. Эти коллоидные частицы и формируют структуру с иммобилизационной водой. А.Ф.Лебедев впервые разработал классификации пывунов и некоторые методы оценки пывунных свойств. Конечно, данное явление свойственно в основном песчаным породам и практически не встречается в естественных почвах..

О топких болотах, зыбучих песках и пlyingунах

О топких болотах, которые «засасывают» людей и животных, рассказывают самые страшные истории, нередко настолько приукрашенные, что трудно отделить правду от вымысла. Хотя и вправду – это природное образование очень опасно для всего живого. Теперь, зная о физической основе явления тиксотропии, можно достаточно подробно представить механизм этого опасного явления. Топкие болота – это места, где распространены глинистые насыщенные водой тиксотропные минералы. Внешне эти места действительно кажутся твердыми, прочными, устойчивыми. Но стоит только на них ступить, проявить какие-либо механические воздействия, как они начинают резко терять свою прочность и устойчивость. Это тиксотропные болота. К несчастью, выбраться из таких мест практически невозможно. Чем интенсивнее животное пытается выбраться из болота, чем быстрее двигает конечностями, тем сильнее «разжижается» болото, тем сильнее «засасывает» оно животное. И даже когда животное совсем замрет, то и биения сердца бывает достаточно для перехода водонасыщенной глины из прочного в текучее состояние.

Зыбкие пески – также тиксотропные образования. Это, как правило, насыщенные водой пески с примесью глин, способные к тиксотропному разжижению при воздействии механических нагрузок. Из такого песка выбраться еще труднее, чем из глинистого тиксотропного болота. А некоторые зыбкие (или зыбучие) пески обладают такой низкой величиной прочностных структурных связей, что не способны выдерживать и легких вибраций.

А вот пlyingуны проявляются только тогда, когда вода, насыщающая эти дисперсные породы, приходит в движение. Например, при копке колодца, в горной выработке. Но тоже при механическом воздействии, когда вода переходит из неподвижного (связного) состояния в подвижное. Причем пlyingуны – это не обязательно пески, но и лёссы, и глинистые породы. В исследованиях пlyingунных образований очень много сделано известным геологом и почвоведом Александром Федоровичем Лебедевым. Вот как образно А.Ф. Лебедев описывал пlyingун: «Если встать на площадку вскрытого пlyingуна и попробовать раскачиваться, переминаясь с ноги на ногу, то пlyingун ведет себя как зыбун, причем вполне передается, по определению на глаз, на расстояние 4–5 м. Если такое раскачивание продолжать минут 10,

то нога погружается в плавун на 10– 15 см». Такое вот интересное явление и как образно описано, не правда ли?

Заметим, что, когда речь шла о тиксотропии и реопексии, отмечалось, что под механическим воздействием изменяется прочность глинистой смеси. Прочность – не что иное, как поведение почвы (глинистой массы) под нагрузками, близкими к критическим, когда происходит разрушение (изменение) структурных связей почвы. Более подробно с механическими свойствами мы будем знакомиться позднее. Отметим два важных момента в отношении тиксотропии: (1) в случае тиксотропии и реопексии происходит изменение прочности глинистых систем во времени; (2) эти явления распространяются только в водонасыщенных грунтах. Поэтому, когда речь идет об изменении прочности, то это касается прежде всего изменения вязкости. Но не только прочность может меняться под механическим воздействием. Может меняться и плотность. Это явление носит название *дилатансии*.

Дилатансия может сопровождаться изменением плотности (и прочности) почвы при механическом воздействии (как правило, при деформации сдвига). Схематически явление дилатансии выглядит следующим образом (рис 54). При возникновении сдвиговых усилий песчаные частицы могут перемещаться друг относительно друга, образуя более рыхлые или более плотные упаковки – происходит изменение плотности песчаных образований под действием сдвиговых усилий.

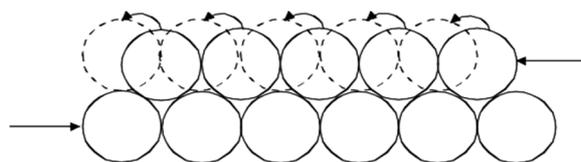


Рис. 54. Механизм формирования дилатантных свойств песчаных почв

В случае дилатантных явлений связи между частицами разрушаются, происходит сдвиг частиц друг относительно друга, последствием чего может быть образование более плотных упаковок частиц. Это явление сопровождается последующим самопроизвольным восстановлением исходного сопротивления деформации за счет сил тяжести по прекращению действия механических сил. Оно повсеместно проявляется в почвах при различных механических воздействиях на нее. Безусловно, в случае воздействия, например, колесной техники это явление выступает совместно с другими, в этом случае почва подвергается нор-

мальным мгновенным и касательным нагрузкам. Мы сталкиваемся с этим явлением, когда изучаем сопротивление пенетрации в песчаных, опесчаненных почвах, горизонтах. В результате, как правило, почвоведы изучают реологические, а точнее, структурно-механические свойства, физическую основу которых составляют рассмотренные реологические, дилатантные явления и модели.

Основные положения

1. Основным реологическим понятием для почв является деформация, которая подразделяется на упругую и пластическую (остаточную). Изучение деформаций почв основано на использовании следующих параметров: напряжений сжатия (P_σ) и сдвига (P_i), а для изменений порового пространства – коэффициент пористости (e) и уплотнение (осадка) – l_p для напряжений сжатия, тангенс угла сдвига ($\operatorname{tg}\alpha$), сдвиг (γ) и скорость сдвига, или скорость деформации для сдвиговых деформаций.

2. В классической реологии предложен ряд идеальных «образов» – реологических моделей: модели идеально упругого, идеально вязкого и идеально пластичного тел. Реальные природные объекты моделируются с помощью различных комбинаций указанных идеальных моделей.

3. Вязкость структурированных суглинистых систем (почвенных паст в диапазоне влажности, близком к насыщению) – величина переменная и при некотором воздействующем напряжении резко снижается за счет разрушения структурных связей, достигая постоянных значений при минимальном напряжении разрушения или максимальном пределе текучести. Поведение почвенных паст описывается моделью Бингама–Шведова. Зависимости эффективной вязкости от напряжения – реологические кривые, на которых определяют характерные величины: напряжения P_{i1} и P_{i2} предел текучести и максимальный предел текучести, η_0 и η_m – максимальная и минимальная эффективные вязкости, отражающие структурные свойства глинистых паст.

4. Одна и та же почва (даже почвенный образец) в зависимости от влажности может проявлять свойства текучего, упругого, пластичного и хрупкого (разрушающегося на отдельности) тела. При влажности почвы, близкой к полному насыщению до определенного предела

влажности, почва проявляет свойства текучести, которые описываются моделью Бингама–Шведова. Этот предел назван «пределом текучести» (по Аттербергу). При понижении влажности в почве начинают проявляться слабоупругие свойства. Это диапазон вязкоупругого тела (модель Барджеса), но до определенного предела влажности – предела пластичности. При дальнейшем понижении влажности почва распадается на отдельные части – это свойство хрупкости. Почва описывается моделью Пойнтина–Томпсона.

5. Реологические константы, константы Аттерберга, согласуются с определенными почвенными гидрологическими константами. Предел текучести – с капиллярной влагоемкостью, предел пластичности – с влажностью разрыва капиллярной связи.

6. Важнейшие реологические свойства, чаще в полной мере проявляющиеся в породах и реже в естественных почвах, – это тиксотропия, реопексия, пльвунность и дилатансия. *Тиксотропия* – свойство тонкоглинистых (коллоидных) насыщенных влагой полутвердых систем разжижаться под влиянием механического воздействия, а затем, после прекращения воздействия, переходить в прежнее полутвердое (гелеобразное) состояние. *Реопексия* – явление в целом противоположное тиксотропии: возрастание прочности структуры (вязкости) при действии напряжения. *Пльвунность* – это способность водонасыщенных грубодисперсных систем переходить в текучее состояние с очень низкой вязкостью при напряжениях выше предела прочности связей между частицами и оставаться (в отличие от тиксотропных пород) в текучем состоянии по прекращении механического воздействия. *Дилатансия* – это свойство почв и пород самопроизвольно восстанавливать исходное сопротивление деформации за счет сил тяжести по прекращению действия механических сил. Дилатансия может сопровождаться изменением плотности почвы (грунта) при механическом воздействии (как правило, при деформации сдвига).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Законы продукционного процесса
2. Световая фаза фотосинтеза
3. Темновая фаза фотосинтеза
4. Влияние интенсивности света на интенсивность фотосинтеза
5. Влияние спектрального состава света на интенсивность фотосинтеза
6. Влияние влажности на интенсивность фотосинтеза
7. Влияние температуры на интенсивность фотосинтеза
8. Дыхание, схема дыхания
9. Характеристика влаги в почве. Влажность почв
10. Почвенно-гидрологические константы
11. Понятие о влагообеспеченности растений
12. Транспирация, виды транспирации
13. Факторы управления водообеспеченности растений
14. Термодинамический подход к описанию передвижения влаги в системе «почва-растение-атмосфера»
12. Основные элементы минерального питания растений
13. основные механизмы переноса веществ к корню растения
14. Транспорт веществ по растению
15. Направление светового потока
16. Влияние интенсивности света на параметры роста
17. Фотопериодичность
18. Основные параметры роста и развития
19. Параметры роста
20. Влияние физических факторов на рост растений
21. Типы связей межчастичного взаимодействия
22. Типы межчастичных контактов
23. Виды деформации, пластичность, вязкость
24. Количественные параметры деформаций: линейная и объемная
25. Изменение порового пространства при деформации
26. Деформация сдвига

27. Идеально-упругое тело – закон Гука
28. Идеально вязкое тело – закон Ньютона
29. Идеально-пластичное тело – закон Сен-Венана-Кулона
30. Вязкопластичное тело (модель Бингама-Шведова)
31. Упруговязкое (модель Борджеса) и упруго-хрупкое тело (модель Пойтинга-Томпсона)
32. Пределы Аттерберга, число пластичности
33. Тиксотропия, реопексия
34. Пльвунность, дилатансия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии изложены основные разделы агрофизики и реологии почв.

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.

Реология почв как один из разделов механики показывает особенности течения почвенных тел, типы связей и структур межчастичного взаимодействия, виды деформации почв, реологические законы для идеальных почвенных систем, дает основные реологические модели, применяемые к почве. Раскрывает понятия тиксотропии, реопексии, пływунности и дилатансии, имеющих огромное значение в окружающих нас ландшафтах и нередко приводящие к катастрофическим последствиям.

Надеемся, что издание поможет студентам, магистрантам, аспирантам и специалистам в области сельского хозяйства приобрести новые знания в области агрофизики и реологии почв.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мушкин И.Г. Влагообеспеченность сельскохозяйственных полей. – Л.: Гидрометеиздат. 1971.
2. Слейчер Р., Макилрой И. Практическая микроклиматология. – М.: Изд-во «Прогресс». 1964.
3. Хромов С.П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат. 1955.
4. Тооминг Х.Т. Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеиздат. 1977.
5. Тооминг Х. Т. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат. 1984.
6. Шульгин А. М. Агрометеорология и агроклиматология. – Л.: Гидрометеиздат. 1978.
7. Бучинский И. Е. Засухи и суховеи. – Л.: Гидрометеиздат. 1976.
8. Слейчер Р., Макилрой И. Практическая микроклиматология. – М.: Изд-во «Прогресс». 1964.
9. Шульгин А. М. Климат почвы и его регулирование. 2-е издание. –Л.: Гидрометеиздат. 1972.
10. Шульгин А. М. Агрометеорология и агроклиматология. – Л.: Гидрометеиздат. 1978.
11. Ревут И. Б. Физика почв. – М.: Изд-во «Колос», 1972.
12. 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.
13. Основы агрофизики. – М.: Физматгиз, 1959
14. Полуэктов Р. А. Динамические модели агроэкосистем. – СПб, Гидрометеиздат, 1993. – 310 с.
15. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 319 с.

16. Сиротенко О. Д. Математическое моделирование вводно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. –Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 163 с.
17. Медведев В. В., Булыгин С. Ю, Т.Н.Лактионова, Р.Г.Деревянко. Критерии оценки пригодности земель Украины для возделывания зерновых культур // «Почвоведение», №2. 2002. – С.216-227.
- 18.Судницын И. И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1979. – 253 с.
19. Слейчер Р. Водный режим растений. – М.: Мир, 1970.
20. Физика среды обитания растений. – Л., 1968. – 304 с.
21. Шульгин И. А. Солнечная радиация и растение. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 179 с.
22. Барбер С. А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. Пер. с англ. – М.: Агропромиздат, 1988. – 376 с.
23. Най П. Х., Тинклер П. Б. Движение растворов в системе почва–растение. – М.: Колос, 1980. – 365 с.
- 24.Тооминг Х. Т. Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеоиздат,1977. – 200 с.
- 25.Сабинин Д. А. Физиология развития растений. М., Изд-во АН СССР. 1963.
26. Тооминг Х. Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984.
27. Сергеев Е. М. и др. Грунтоведение. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1971.
28. Манучаров А. С., Абрукова В. В., Черноморченко Н. И. Методы и основы реологии в почвоведении. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1990.
29. Физико-химическая механика природных дисперсных систем. /Под ред. Е.Д.Щукина, Н.В.Перцова, В.И.Осипова, Р.И.Злочевской. –М.: Изд-во Моск .ун- та, 1985. – 260 с.

30. Шукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. К. Коллоидная химия. –М.: Изд-во Моск.ун-та, 1982. – 348 с.

31. Plant Environment and efficient water use. 1981. Ed. By W.H.Pierre, Don Kirkham, J.Pesek, R.Show. ASA&SSSA of America. – 295 p.

32. Viets 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.

33.Handbook of Soil Science. Ed. By Malcolm E.Sunmer. 2000. CRC Press.

34. 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.

35. Mc Gree R. J. Practical applications of action spectra. In Light and Plant development. 1986. Ed. H.Smith. Butterworths. London. 515 p.

36. Jurik T.W., J.F. Chabot, B.F.Chabot. Ontogeny of photosynthetic performance in *Fragaria vegrinata* under changing light regime. Plant Physiol., 1979.Vol63, 542-547.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1

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 ³	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

Оценка плотности и пористости суглинистых и глинистых почв
в вегетационный период (по Н.А. Качинскому, 1965)

Плотность почвы, г/см ³	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 свежевспаханной 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

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

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

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

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 ⁻² см/сут
Воздухоносная порозность (после 24 часов свободного дренажа)	>15%
Температурный оптимум	18-25° С.

Таблица 7

Оценка переуплотнения почвы по критическим значениям
сопротивления пенетрации
(по Lhotský J., a kol, 1984; Zrubec F., 1998**)

Сопротивление пенетрации (МПа) * Для диапазона влажности (% к ве- су)	Критические значения сопротивления пенетрации для со- ответствующих классов по гранулометрическому составу					
	Глина	Тяжелый суглинок	Средний суглинок	Легкий Суглинок	Супесь	Песок
	2,8 – 3,2	3,2 – 3,7	3,7 – 4,2	4,5 – 5,0	5,5	6,0
28 – 24	24 – 20	18 – 16	15 – 13	12	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 zúrodnìní zhutnìných pùd . ÚVTIZ Praha, 1984;
Z r u b e c F. Metodika zúrodnenia zhutnených pôd. SFRI, Bratislava. 1998.

Таблица 8

Некоторые характерные физические свойства почв различного грану-
лометрического состава (наиболее вероятный диапазон – в скобках) *

Класс по грану- лометрическому составу	Пороз- ность (% объем- ный)	Плот- ность почвы, г/см ³	НВ (% к ве- су)	ВР К (% к ве- су) **	ВЗ (% к ве- су)	ДД В (% к ве- су)	Коэффици- ент филь- трации, 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

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			
	при-ток	отток	Минимальных ночных температур весной и осенью, °С	Длительности безморозного периода, дни	Суммы температур за безморозный период, °С	Минимальной температура 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 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

Система оценки агроклиматических условий

Показатели	Термические	Влагообеспеченности	Ветровой режим	Перезимовка
Средние	<ul style="list-style-type: none"> – среднегодовая температура; – среднемесячные температуры самого холодного и самого теплого месяцев; – среднемноголетние минимальная и максимальная температуры самого холодного и самого теплого месяцев; – среднемесячные относительная влажность и температура воздуха; 	<ul style="list-style-type: none"> – среднегодовое количество осадков; – среднемноголетние количества осадков 	Скорость ветра в году и в отдельные периоды вегетации	средняя высота снежного покрова;
Абсолютные	<ul style="list-style-type: none"> – минимум и максимум температуры; – критические (лимитные) температуры всходов и созревания; 	<ul style="list-style-type: none"> – запасы продуктивной влаги в слое почвы 0...20 см осенью перед началом сева озимых и в слое 0–100 см весной; – относительная влажность воздуха в 13 часов; – дефицит влажности воздуха; – испаряемость 		<ul style="list-style-type: none"> – влажность почвы перед промерзанием и установлением устойчивого снежного покрова; – губительная температура
Суммы	<ul style="list-style-type: none"> – температур выше 15, 10 и 5 °С за вегетацию – среднесуточных температур почвы 	<ul style="list-style-type: none"> – сумма осадков за год; – сумма осадков за вегетацию 		температур ниже 0°С (суровость зимы);

	<ul style="list-style-type: none"> – выше 10 °С на глубине 5 и 10 см; – биологических температур 	<ul style="list-style-type: none"> – суммы осадков за зиму, весну, лето, осень; – дефицитов влажности воздуха 		
Длительность	<ul style="list-style-type: none"> – длительность периодов со среднесуточными температурами выше 5, 10 и 15 °С; – длительность безморозного периода; 	<ul style="list-style-type: none"> – число дней с относительной влажностью воздуха >80% и <30%; 	<ul style="list-style-type: none"> – число дней в году со скоростью ветра выше 5 м/с; – число дней в году с суховеями 	<ul style="list-style-type: none"> – число дней в году с оттепелями; – продолжительность оттепелей;
Даты	<ul style="list-style-type: none"> – даты прохождения среднесуточных температур через 0, 5, 10 и 15 °С весной и осенью; – даты первого осеннего и последнего весеннего заморозков (средне-многолетние и экстремальные – самые ранние осенние, самые поздние весенние) 			даты установления и схода снежного покрова
Вероятность		<ul style="list-style-type: none"> – обеспеченность (суммарная вероятность) осадками; – выпадения ливней и сильных дождей в отдельные периоды; – вероятность проявления засух в отдельные периоды вегетации 	<ul style="list-style-type: none"> – вероятность скоростей ветра выше 5 м/с в отдельные периоды вегетации; – вероятность суховеев в отдельные периоды 	вероятность наступления оттепелей

Учебное электронное издание

КОРЧАГИН Алексей Анатольевич
МАЗИРОВ Илья Михайлович
ЩУКИН Иван Михайлович

АГРОФИЗИКА И РЕОЛОГИЯ ПОЧВ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Кафедра почвоведения, агрохимии и лесного дела
k.vlgu@yandex.ru