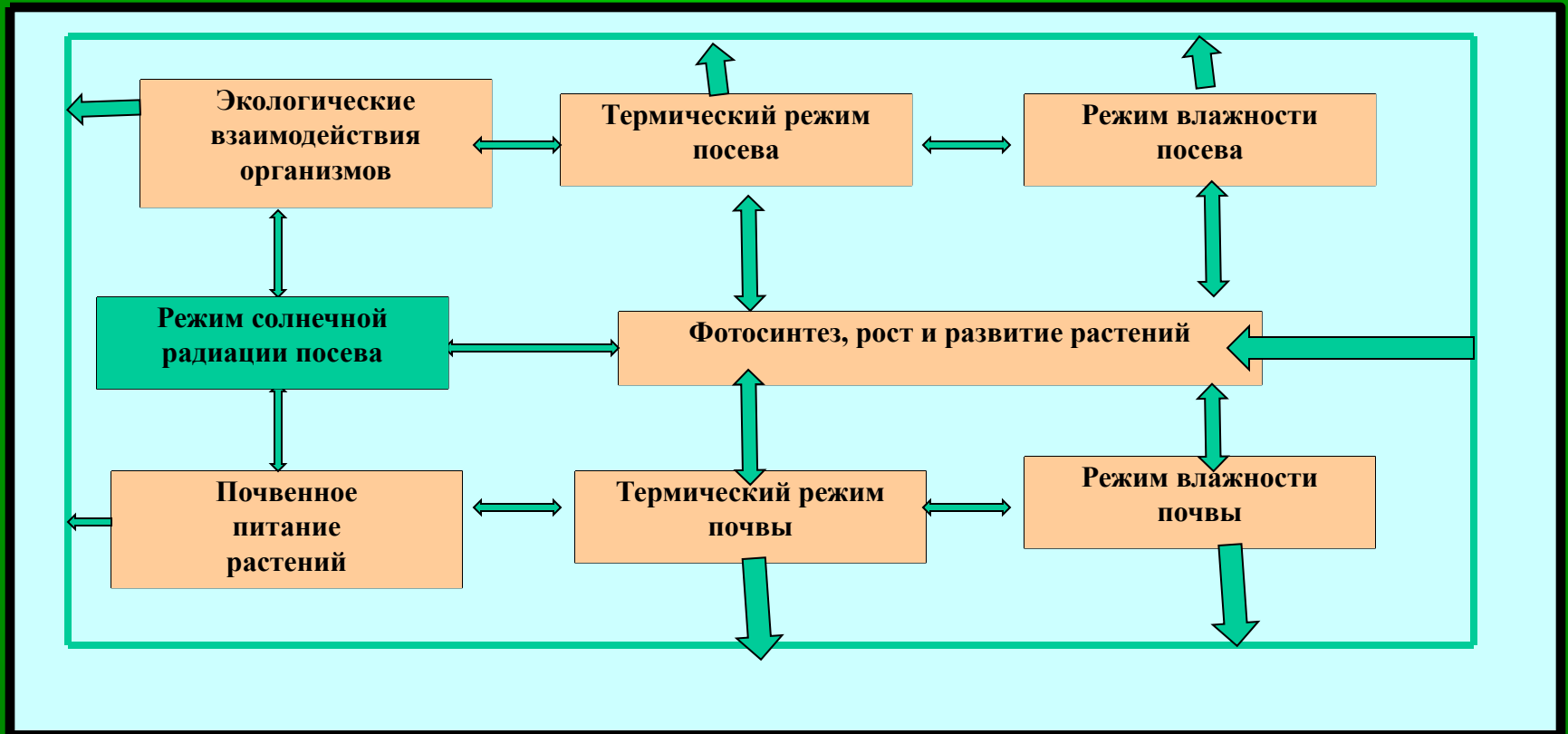


## Лекция 3

# РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЭКОСИСТЕМЫ



Основным  
энергетическим фактором  
большинства экосистем  
является  
солнечная радиация.

## *Лекция 3*

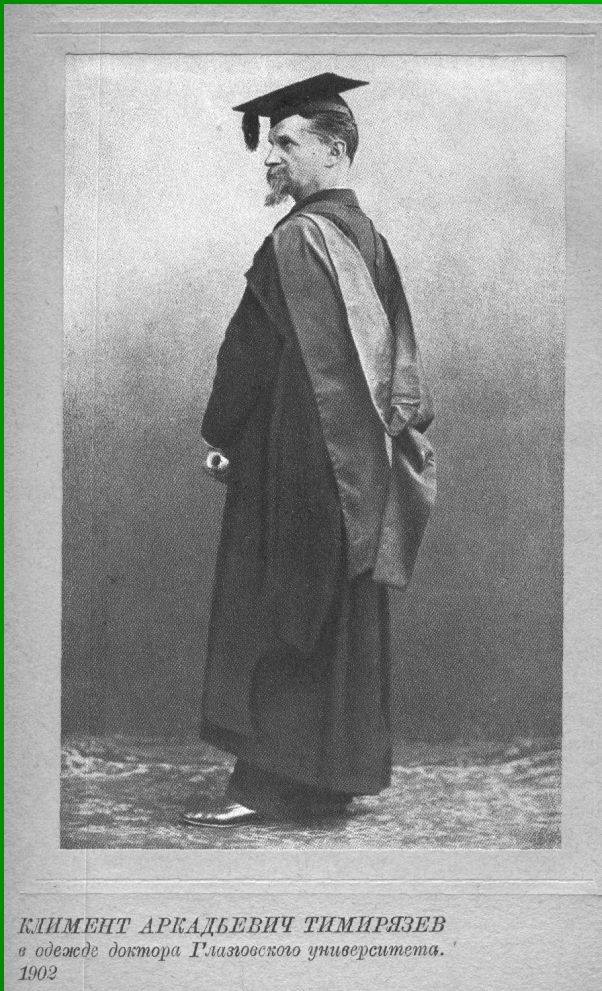
# РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЭКОСИСТЕМЫ

- СОЛНЦЕ КАК ОСНОВНОЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛА И СВЕТА ДЛЯ РАСТЕНИЯ
- АРХИТЕКТОНИКА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА
- МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВОГО УРОВНЯ ПРОДУКТИВНОСТИ

# СОЛНЦЕ КАК ОСНОВНОЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛА И СВЕТА ДЛЯ РАСТЕНИЯ

Жизнь на Земле возникла, развивалась, продолжает развиваться и существовать благодаря Солнцу. Энергия солнечных лучей преобразуется в процессе фотосинтеза в органические соединения, которые составляют 90...95% биологической массы растения. На долю минеральных элементов приходится всего лишь 5...10%.

Поэтому-то русский физиолог К.А. Тимирязев в основу плодородия почвы, а, следовательно, и урожайности культур ставил не количество внесенных удобрений, не количество полученной влаги, а именно солнечную энергию.



КЛИМЕНТ АРКАДЬЕВИЧ ТИМИРЯЗЕВ  
в одежде доктора Глазовского университета.  
1902

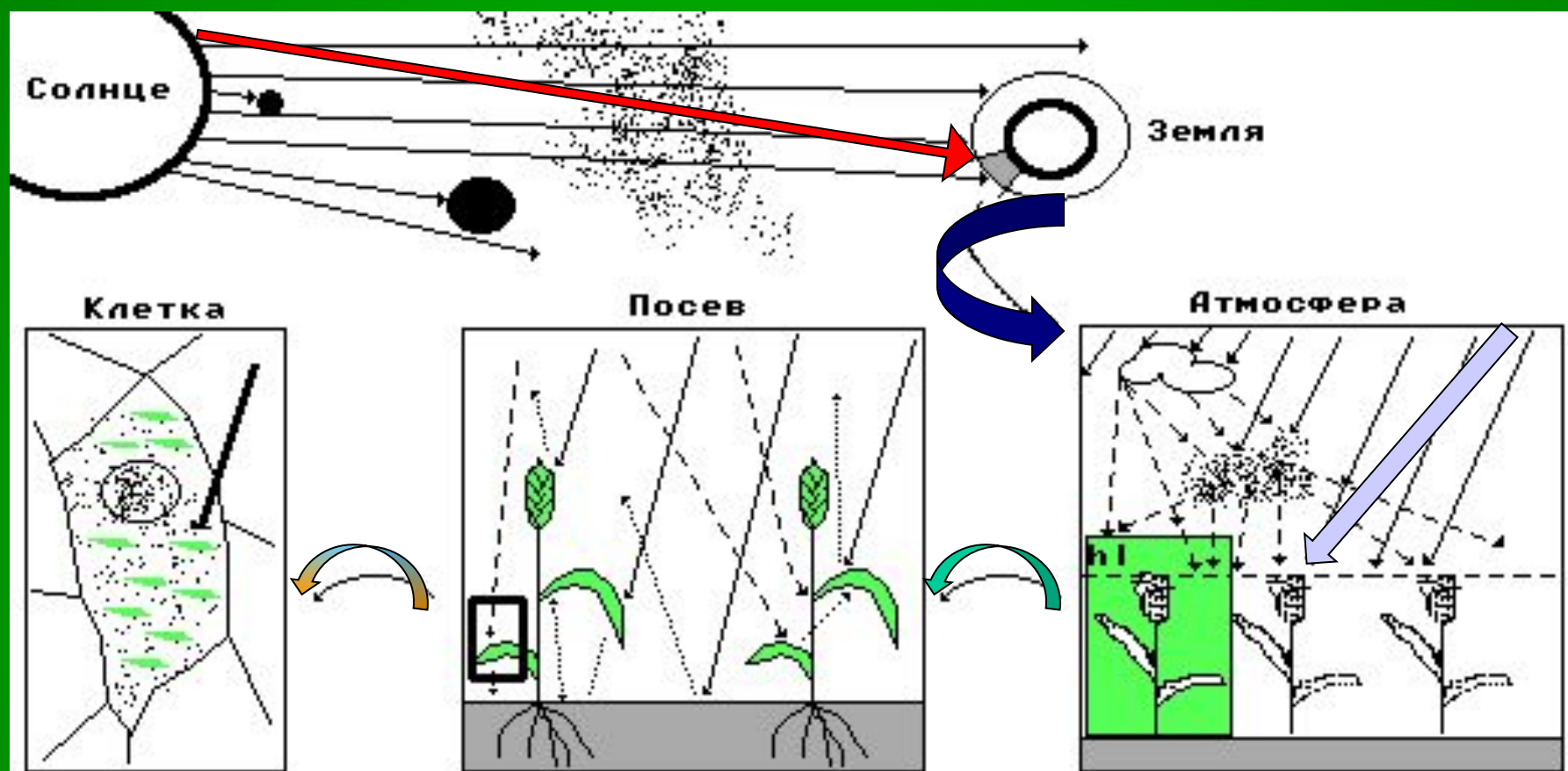
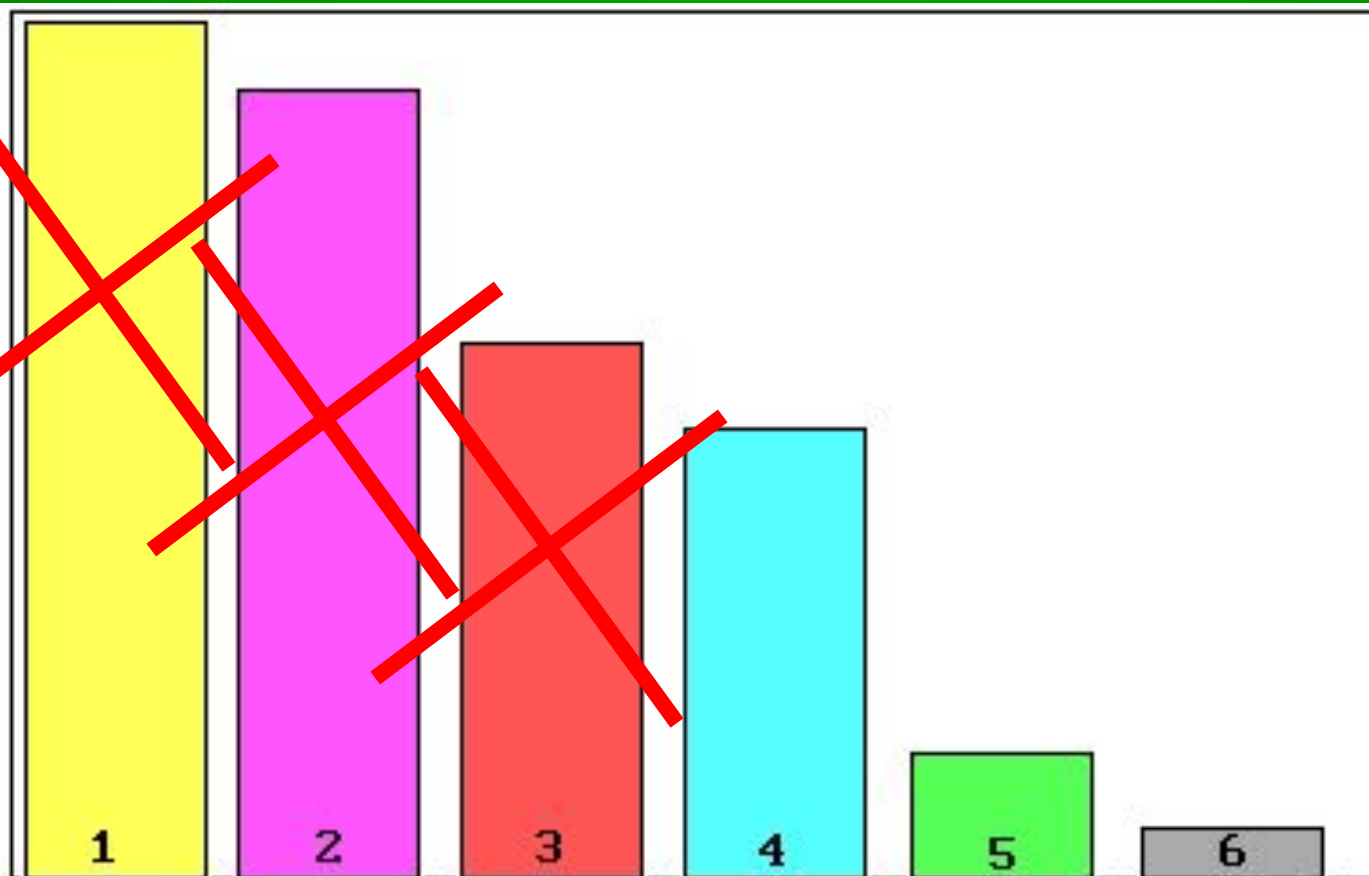


Рис.2. Схема распределения солнечной радиации (Ориг.).  
 Радиация: —————→ — прямая; - - - - - — — рассеянная;  
 .....→ — отраженная.

Итак, на продуктивную функцию растением используется теоретически всего 8...10% поступающей солнечной энергии (К.А.Тимирязев), а практически при обычной агротехнике посевы используют только 0,5...3,0% той *части радиации, которая идет на фотосинтез*, то есть **фотосинтетически активной радиации (ФАР)**. Если всю ФАР принять за единицу, то *доля* от нее, *используемая растением для формирования биомассы*, представляет величину **коэффициента полезного действия ФАР (КПДфар)**.



**Соотношение поступающей солнечной радиации (Ориг.).**  
**Радиация: 1 – Солнца; 2 – на верхней границе атмосферы;**  
**3 – на верхней границе посева; 4 – внутри посева; 5 –**  
**поглощенная листьями; 6 – закрепленная биомассой.**

# *ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ КПД ФАР*

- Во-первых, если часть радиации проходит мимо растений и попадает на почву, желательно уменьшить эти потери **ПОДБОРОМ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА РАСТЕНИЙ НА ЕДИНИЦЕ ПЛОЩАДИ** (которая, в свою очередь, регулируется **НОРМОЙ ВЫСЕВА**).
- Во-вторых, если растение потребляет ФАР от всходов (или начала отрастания) до физиологического отмирания, то чем дольше оно остается зеленым, тем больше накопит биомассы. Следовательно, надо **ЗАЩИЩАТЬ РАСТЕНИЕ ОТ ФИТОФАГОВ** (разумеется не до полного уничтожения последних).
- В-третьих, чем больше площадь листьев и более оптимально их расположение, тем большее количество солнечных лучей будет поглощено листом. Этот вопрос решается селекцией при создании **СОРТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ПЛОЩАДЬЮ ЛИСТЬЕВ И ОПТИМАЛЬНОЙ АРХИТЕКТОНИКОЙ**, а также агротехническими мероприятиями, направленными на **ОПТИМИЗАЦИЮ ВОДНО-ВОЗДУШНОГО И ТЕПЛОВОГО РЕЖИМОВ И РЕЖИМА ПИТАНИЯ**

# АРХИТЕКТОНИКА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Основной показатель, определяющий КПДфар  
- это архитектоника  
растительного покрова,  
то есть *расположение фотосинтезирующих  
органов по высоте посева и их ориентация в  
пространстве.*

**Ориентацию листьев в пространстве можно  
определить двумя углами:**

**наклоном листовой пластины по отношению к  
направлению "вверх" (OI)**

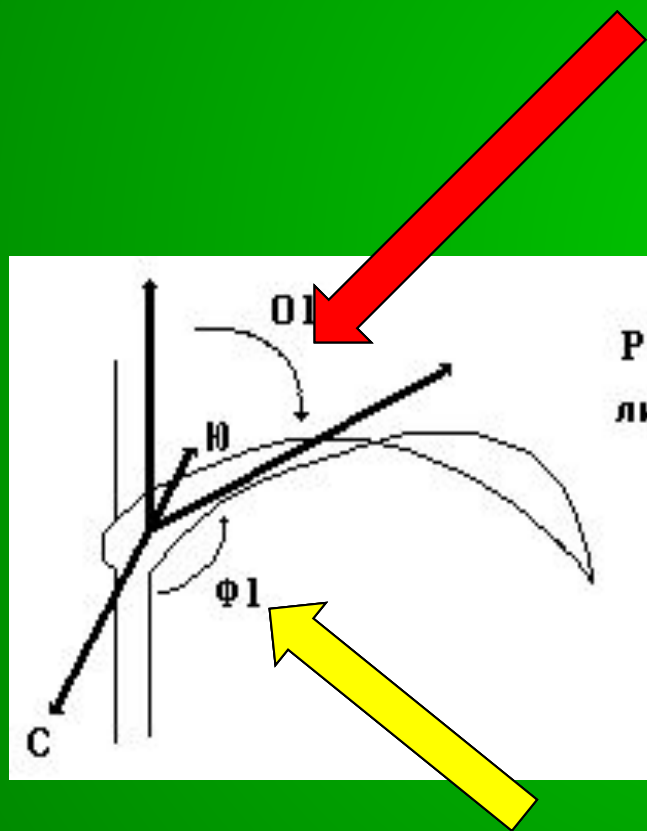


Рис.4. Углы для характеристики ориентации  
листьев в пространстве (по Р.А.Полуэктову)

**и азимутом расположения листовой  
пластинки ( $\Phi I$ )**

растение обычно имеет листья разной ориентации, можно говорить лишь о преимущественном их расположении, которое характеризуется **функцией распределения** ( $q(OI, \Phi I)$ ), показывающей долю листьев, имеющих тот или иной угол наклона. Эта функция зависит от таксономического вида, биологического возраста и высоты расположения листьев на растении.

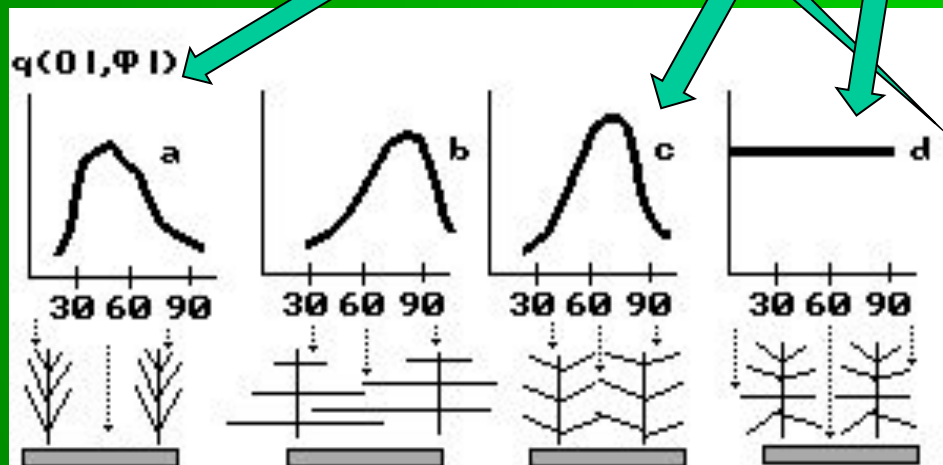
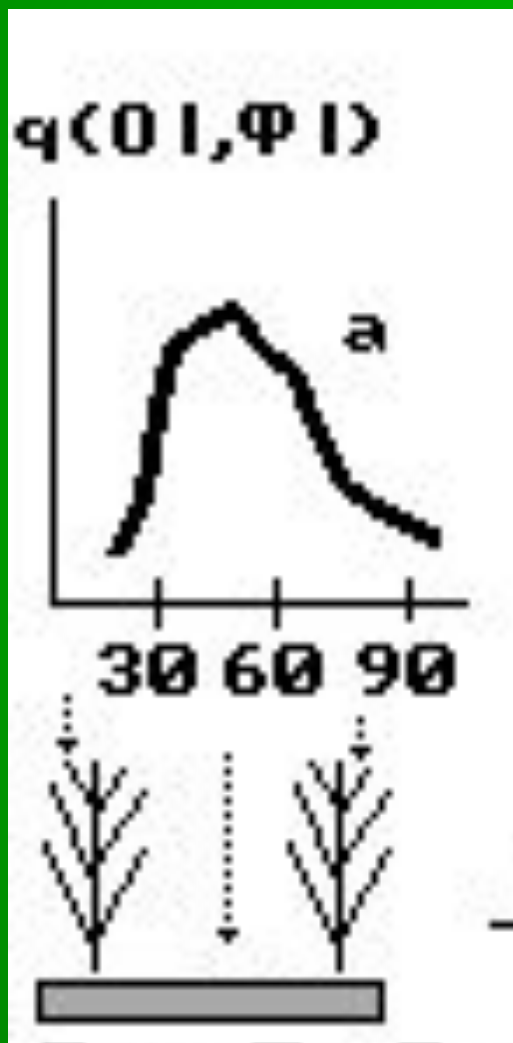


Рис.5. Распределение листьев на растении (Ориг.).

а – преимущественно вертикальное; б – преимущественно горизонтальное; в – промежуточное; д – сферическое; ..... → – поток солнечной радиации.

# ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ВЕРТИКАЛЬНОЕ расположение листьев

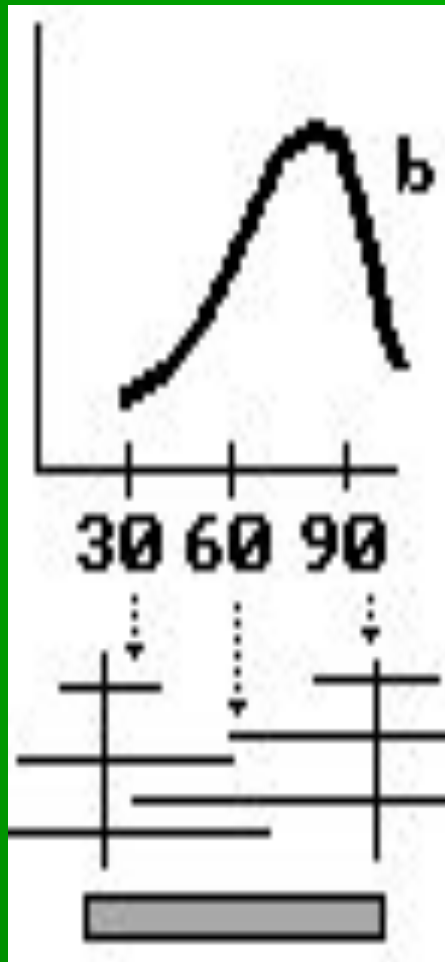


+ лучи освещают все ярусы  
листьев

— значительная часть лучей  
попадает на почву

# ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ

расположение листьев



**+** листья верхнего яруса  
находятся в условиях хорошего  
освещения

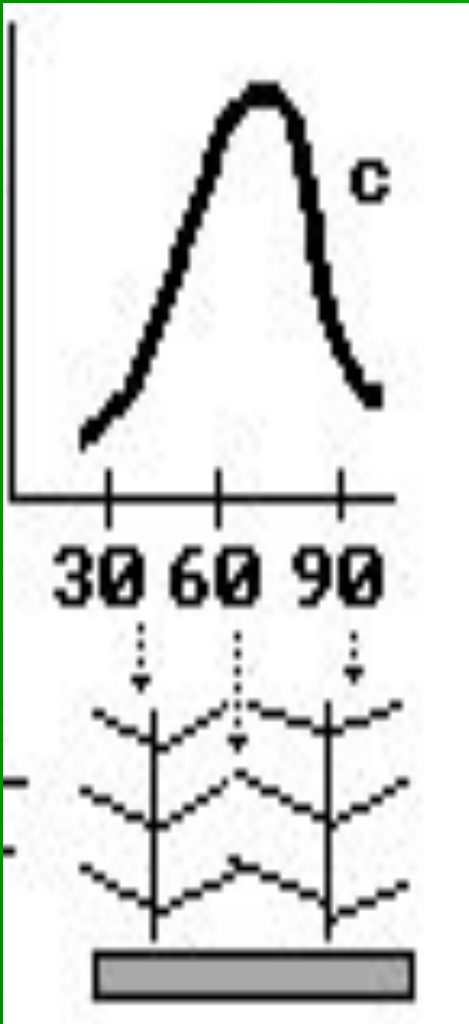
**-** листья верхних ярусов  
затеняют нижние

**-** нижние листья отмирают

**-** общая площадь листового  
аппарата уменьшается

# ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ПРОМЕЖУТОЧНОЕ

расположение листьев

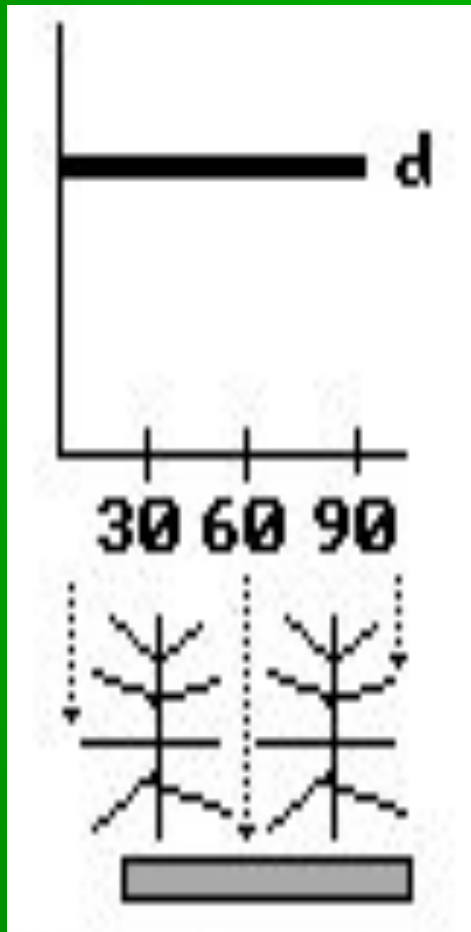


**+** листья верхнего яруса  
находятся в условиях хорошего  
освещения

**-** листья верхних ярусов частично  
затеняют нижние

# СФЕРИЧЕСКОЕ

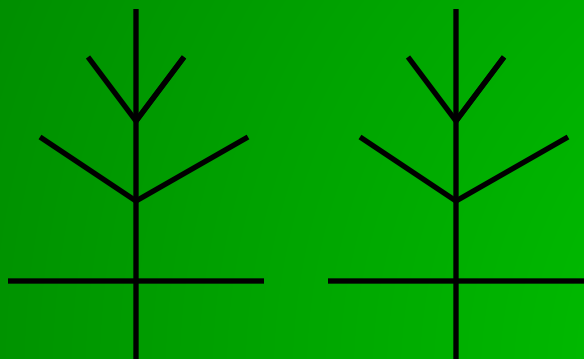
## расположение листьев



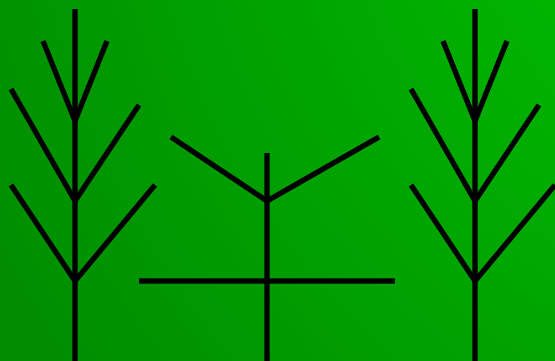
**+** листья находятся в условиях  
хорошего освещения

**—** характерно для деревьев и  
кустарников

# ОПТИМАЛЬНАЯ АРХИТЕКТОНИКА ПОСЕВА



- **Моновидовой посев с оптимальным расположением листьев по ярусам**



- **Поливидовой посев с оптимальным в целом расположением листьев по ярусам**

# МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВОГО УРОВНЯ ПРОДУКТИВНОСТИ

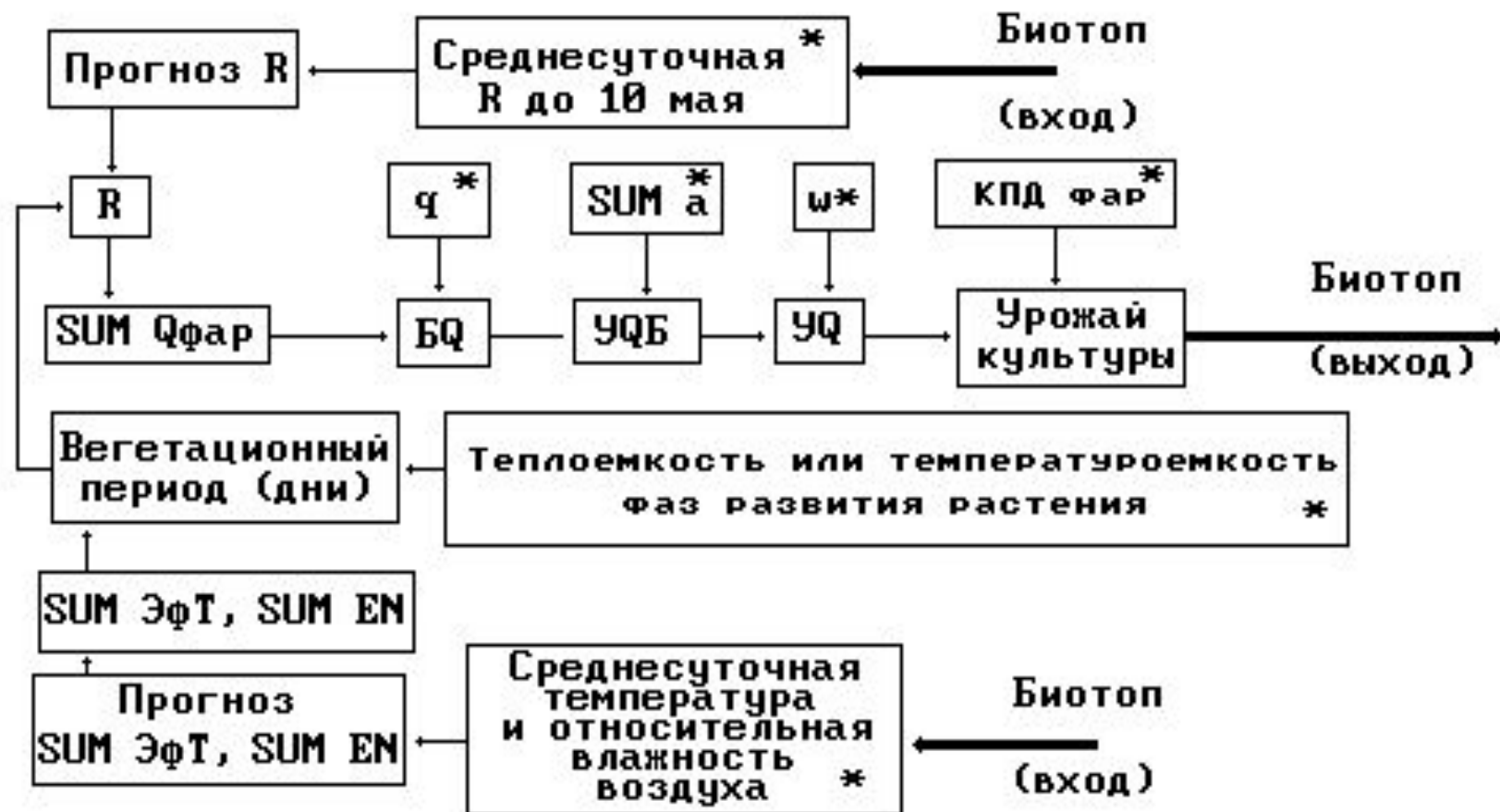
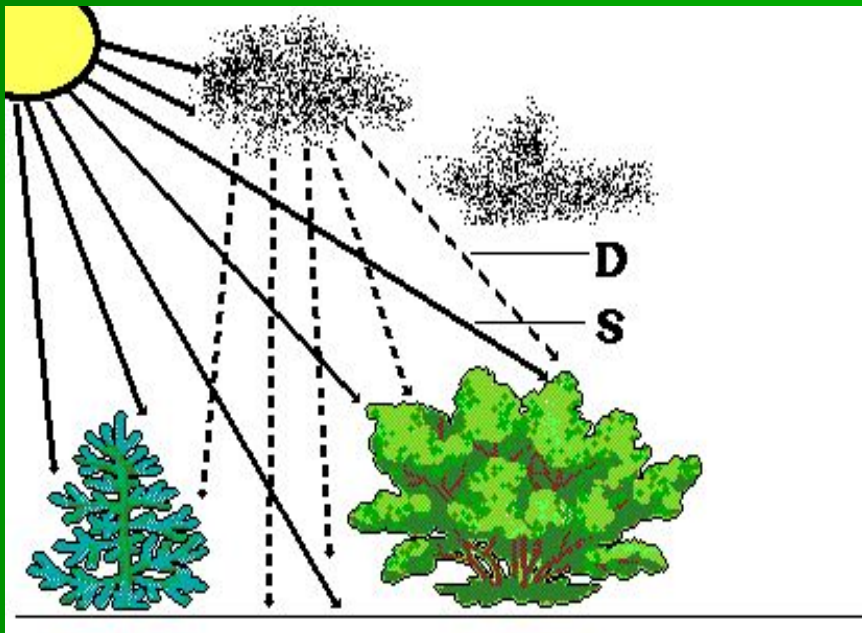


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

# Прогноз среднесуточной интегральной радиации



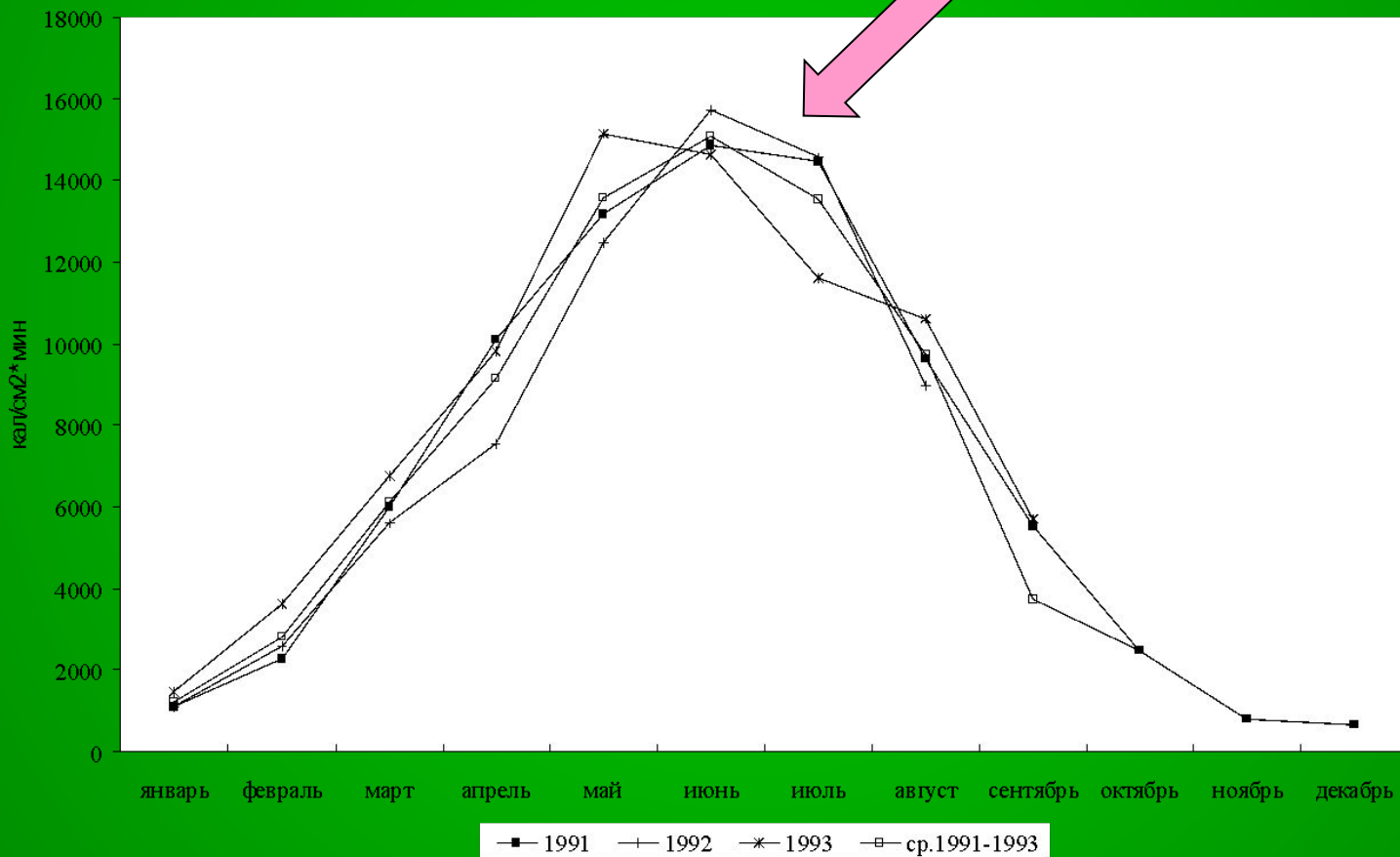
- **Прямая солнечная радиация** - это часть лучистой энергии солнца, поступающая к земле в виде почти параллельных лучей. Обозначается она  $S$  и имеет размерность  $\text{кДж}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ .
  - **Рассеянная солнечная радиация** - часть солнечной радиации, падающая на горизонтальную поверхность после рассеивания атмосферой и отражения от облаков. Обозначается она  $D$  и имеет размерность  $\text{кДж}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ .
- Отсюда **интегральная (суммарная) коротковолновая радиация**, поступающая на горизонтальную поверхность состоит из *поток* **прямой ( $S$ ) и рассеянной ( $D$ ) солнечной радиации**:

$$R = S \cdot \sin h_o + D,$$

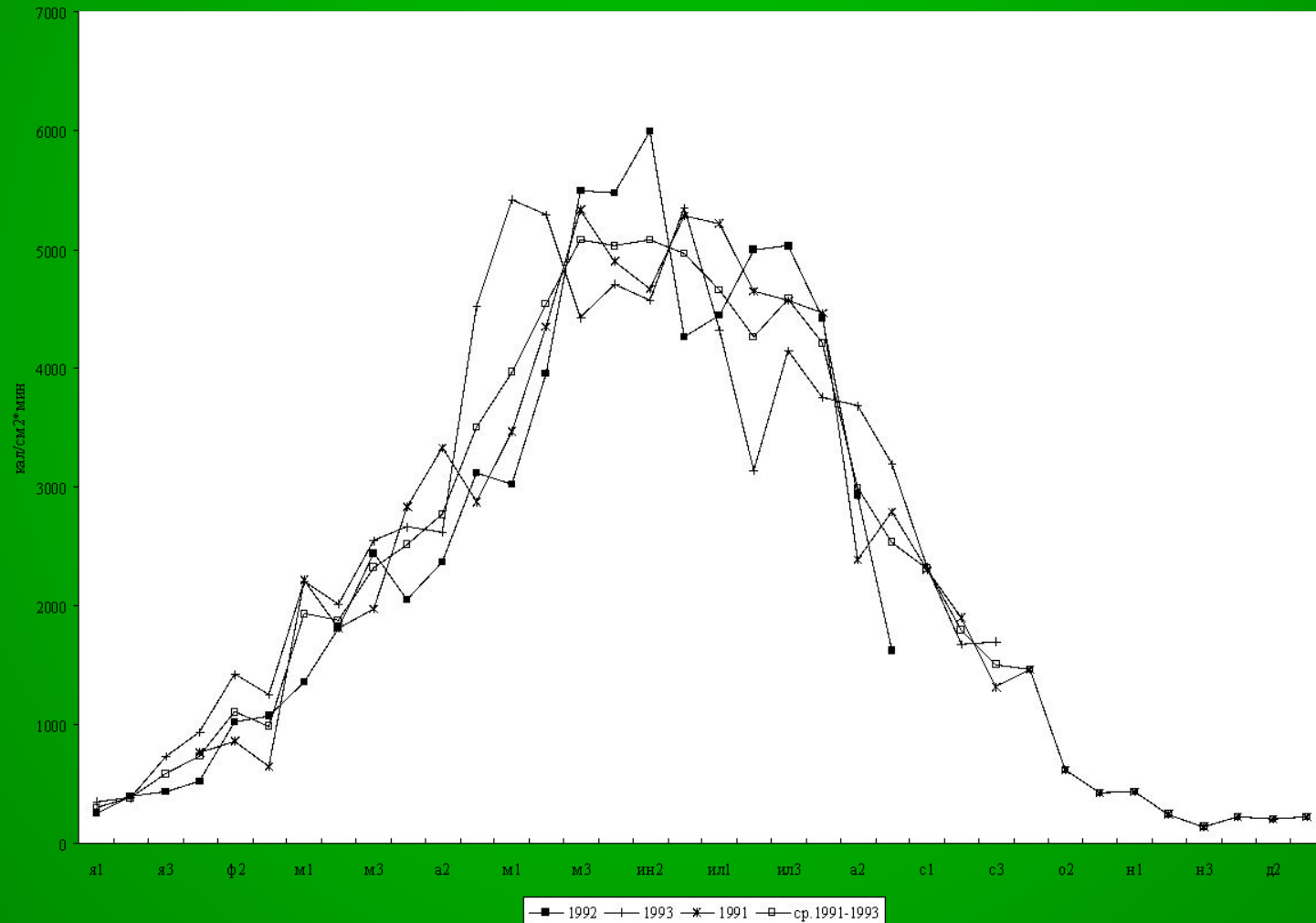
где  $h_o$  - угловая высота Солнца над горизонтом, измеряемая в радианах. 19

**Исследованиями, проведенными на кафедре растениеводства Костромской ГСХА установлена возможность расчета прогноза поступления интегральной радиации с точностью  $99,4 \pm 0,2\%$ , что позволяет значительно снизить ошибку расчета поступления ФАР в период вегетации по сравнению с традиционно используемыми среднемноголетними значениями.**

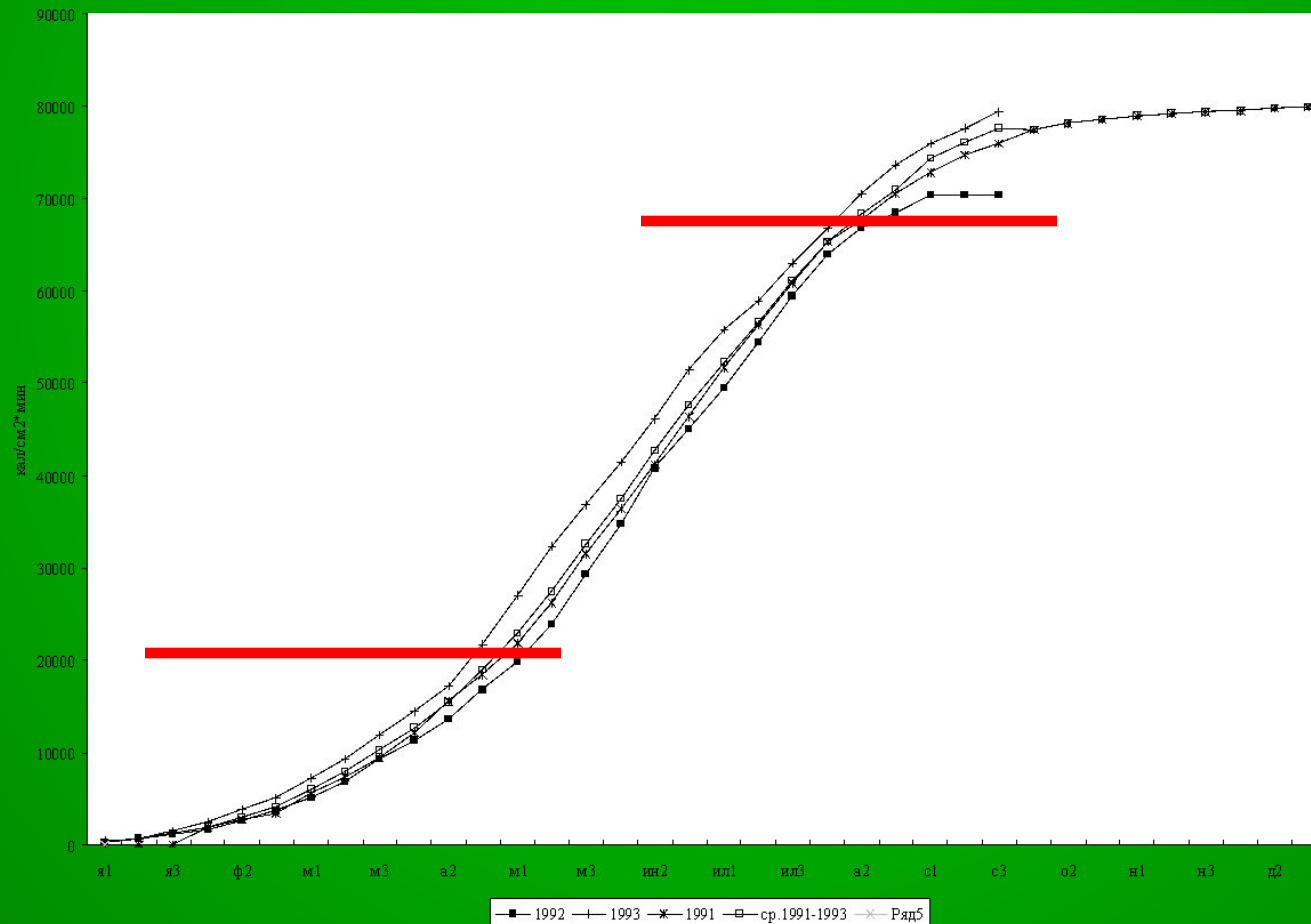
Несовпадение линий за разные годы говорит о ежегодном варьировании количества поступающей радиации, а пересечение линий - о невозможности непосредственно использовать параболическую функцию для прогнозирования.



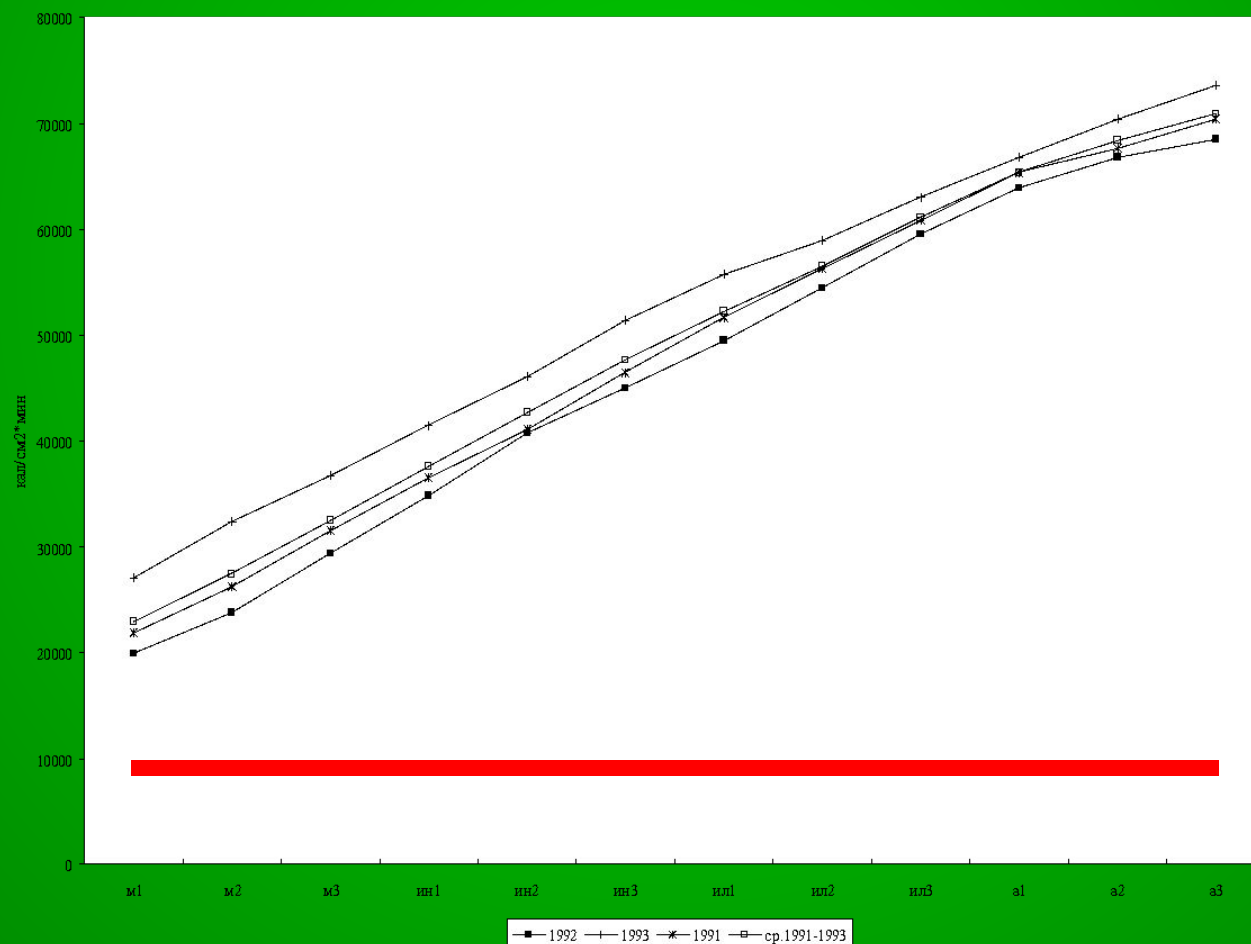
При более мелком дроблении шкалы времени процесс становится еще сложнее, так как колебания динамики по декадам выражены гораздо сильнее.



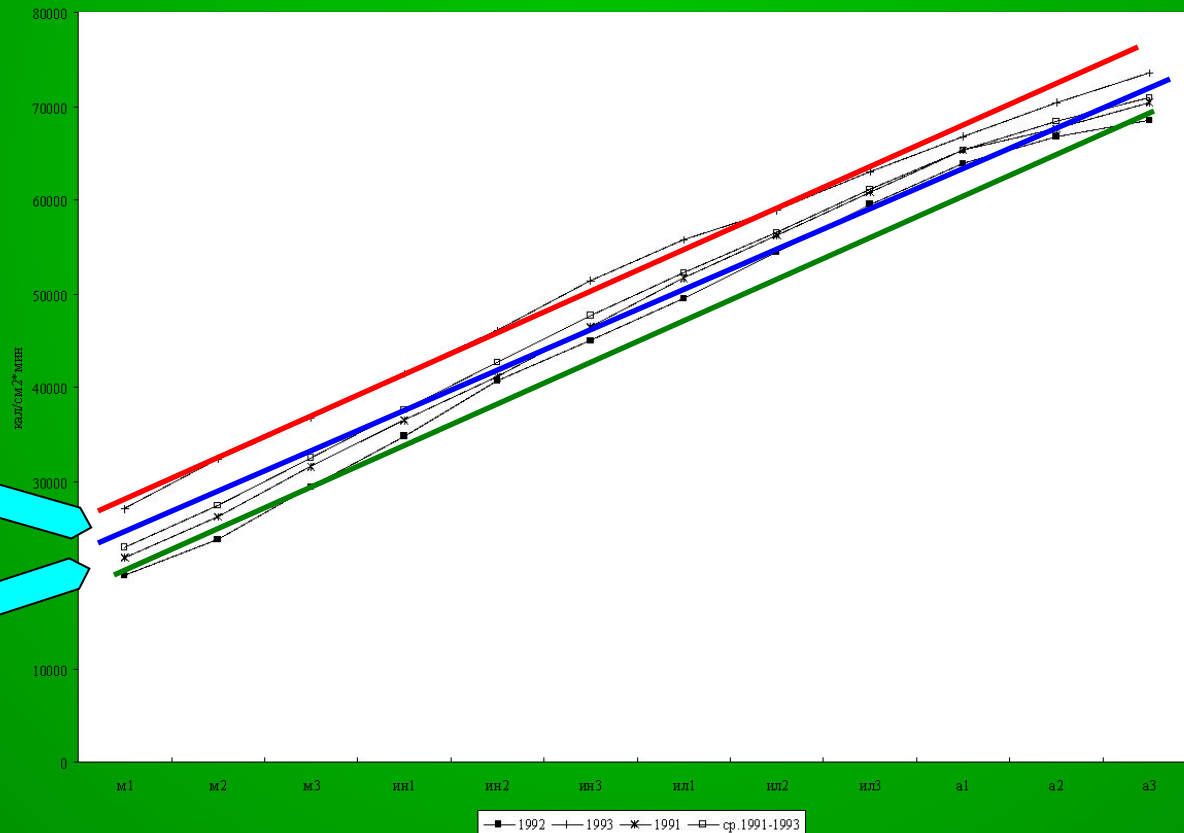
**Если суммировать R с нарастающим итогом, получаются S-образные линии, расходящиеся, в зависимости от условий года, от 10 января до 10 мая, параллельные от 10 мая до 31 августа и несколько расходящиеся к декабрю.**



**Параллельность линий, каждая из которых  
представлена прямой, обеспечивает возможность  
прогнозирования R для довольно значительного  
интервала вегетационного периода, а именно: от 10  
мая до 31 августа**



**если сумма R на 10 мая выше (ниже) средней многолетней, то и до конца августа линия динамики остается выше (ниже). Это отклонение учитывается моделью прогноза.**



Средняя многолетняя динамика поступления суммы  $R$  является прямой линией и рассчитывается по уравнению:

$$R = aX + b$$

*для разработки прогностической модели необходимо ввести поправочный коэффициент, позволяющий осуществить параллельный перенос линии выше или ниже средних многолетних значений. Этот коэффициент ( $R'$ ) представляет собою разность между фактическим уровнем ( $R_{\phi}$ ) и среднемноголетним ( $R_{см}$ ):*

$$R' = R_{\phi} - R_{см}$$

Объединив уравнения, получим:

$$R = aX + b + R'$$

где  $R'=0$ , если  $R_{\phi} = R_{см}$ ;

$R'>0$ , если  $R_{\phi} > R_{см}$ ;

$R'<0$ , если  $R_{\phi} < R_{см}$ .

По прогнозу поступления интегральной радиации за период фотосинтетической деятельности растения можно рассчитать полученную ими величину ФАР, которая составляет примерно 52% интегральной.

$$\Sigma Q_{\text{фар}} = 0,52 \cdot R,$$

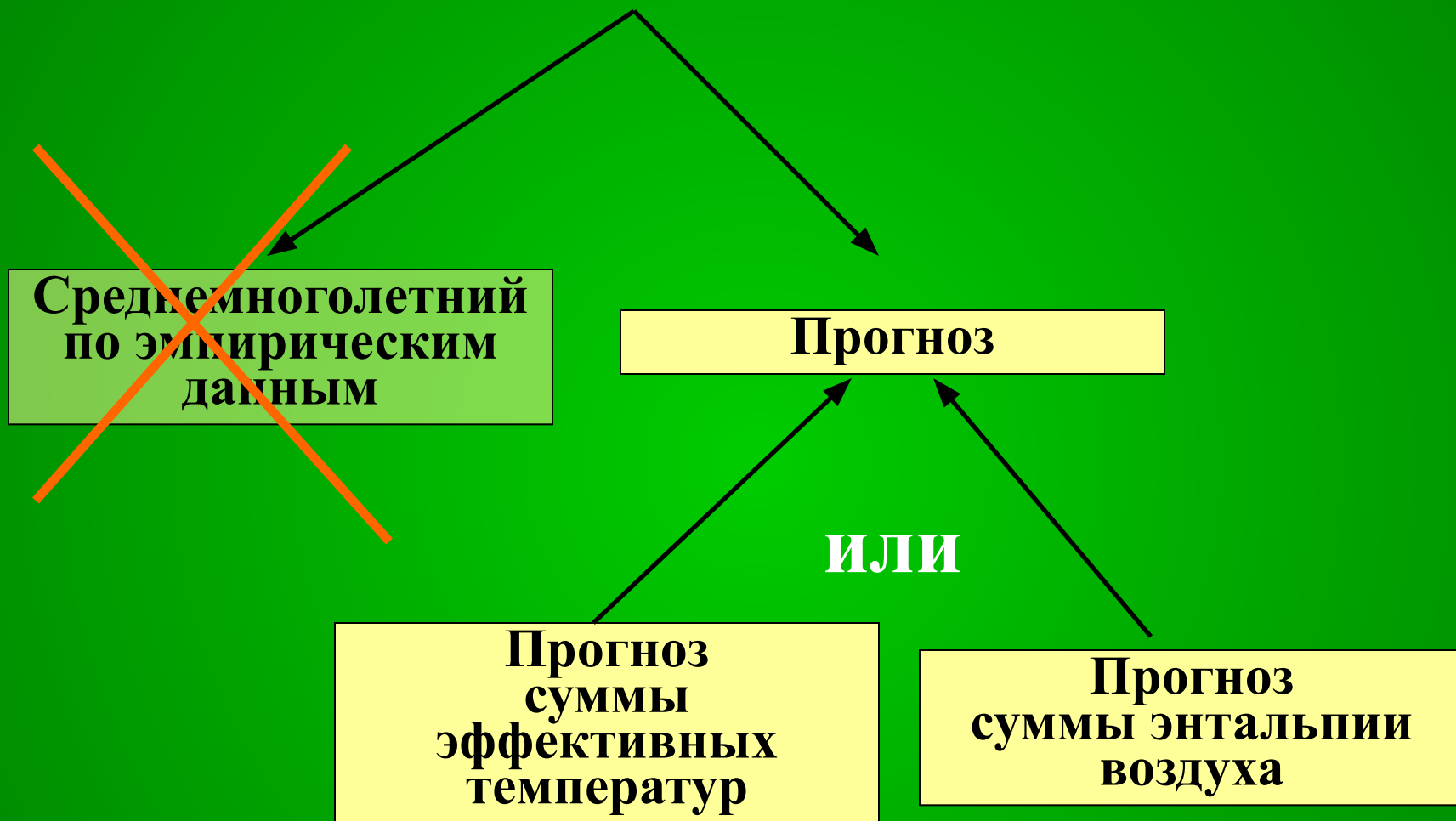
остальные 48% – это длинноволновая радиация, обеспечивающая тепловой режим экосистемы.

Итак, по одному входу модели получена  
интегральная радиация  
Необходимо рассчитать  
продолжительность вегетационного периода



Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

# Расчет вегетационного периода



# Прогноз суммы эффективных температур

*пороговая температура, при которой прекращается рост и развитие называется **эффективной температурой**.*

$$T_{\text{эф}} = t_{\text{ср}} - 5.$$

$$\sum_{i=1}^n T_{\text{эф}} = \sum_{i=1}^n (t_{\text{ср}} - 5)_i$$

$$\sum T_{\text{эф}} = ax + b + T'$$

$$T' = \sum T_{\text{эф}}_{\text{ф}} - (ax + b)$$

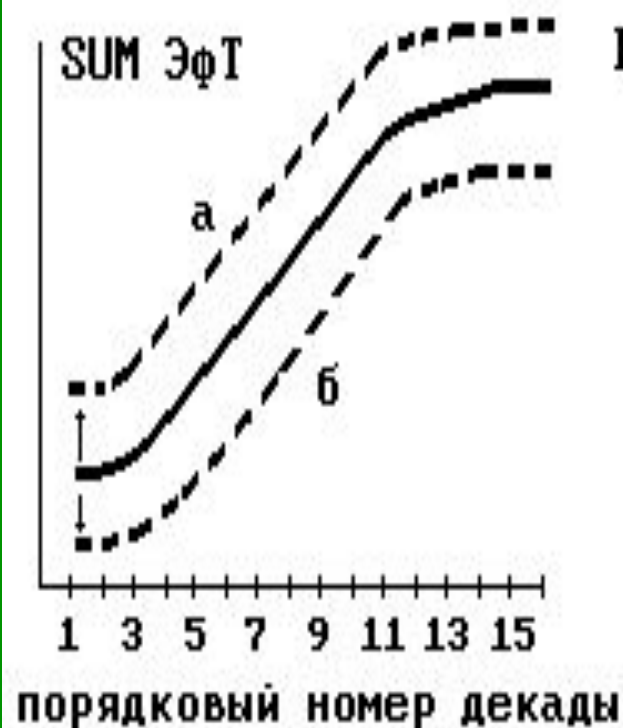


Рис.13. Отклонения от средней многолетней суммы эффективных температур в теплый (а) и холодный (б) годы (Ориг.)

- Таким образом, значение суммы эффективных температур на начало прогноза определяется разностью между фактической и средней многолетней на 10 мая или на любую последующую декаду.

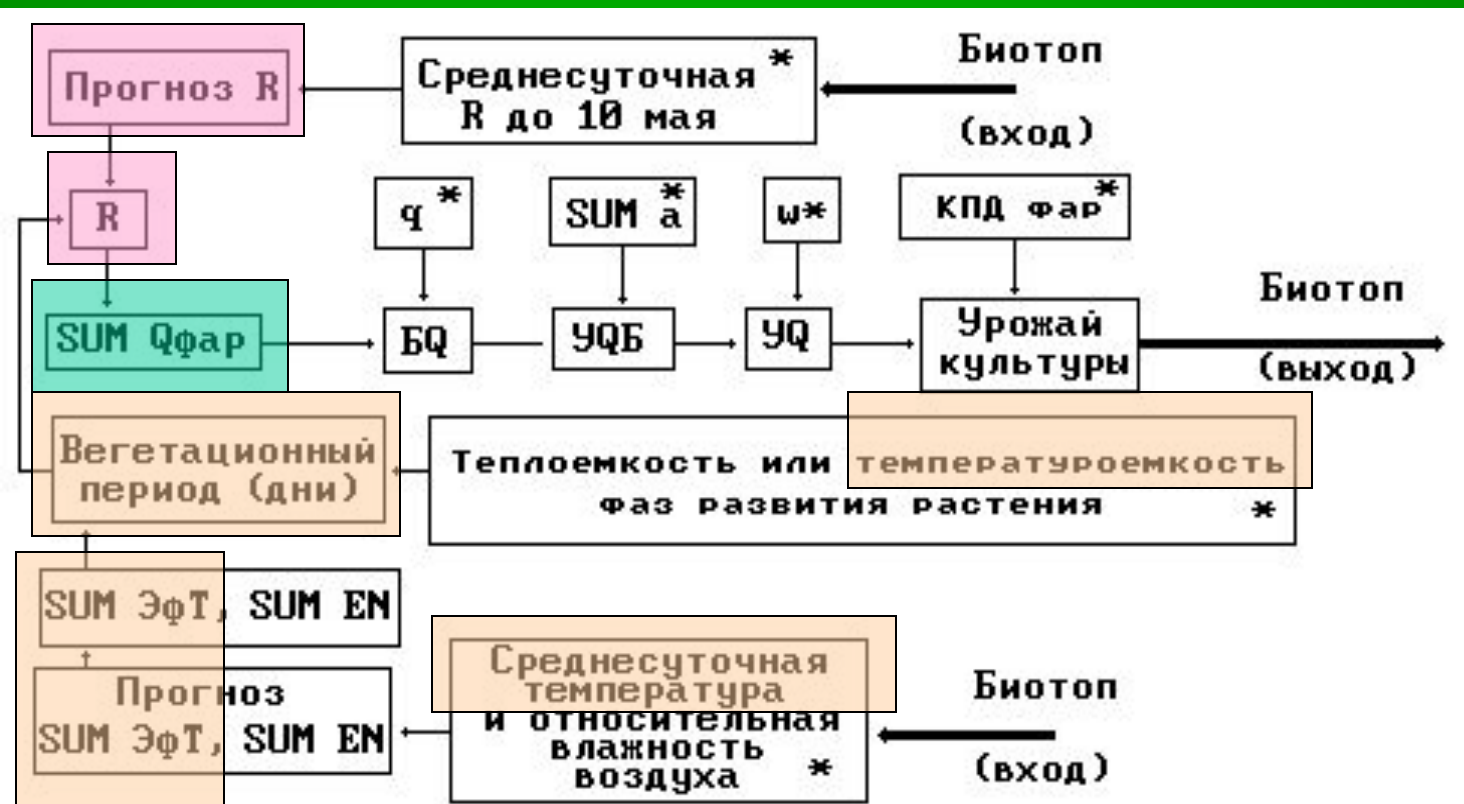


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

Однако важна не температура воздуха сама по себе, а тепло, которое содержится в воздухе.

Какая же между ними разница?

## Прогноз суммы энтальпии воздуха

*при одной и той же температуре в воздухе будет содержаться, а, следовательно, и передаваться организмам, тем больше тепла, чем выше влажность воздуха.*

Таким образом, объединяются уже два климатических параметра: **среднесуточная температура** и **относительная влажность воздуха** и получается критерий, называемый **энтальпией**:

$$C_p = \frac{0,24 \cdot t_{cp} + 0,001 \cdot (622 \cdot (0,01 \cdot f \cdot q))}{(P - 0,01 \cdot f \cdot q) \cdot (595 + 0,46 \cdot t_{cp})}$$

$$\sum_{i=1}^n C_{p_{\phi}} = \sum_{i=1}^n C_{p_i}$$

$$C_p = aX + b + C_{p'}$$

$$C_{p'} = \sum C_{p_{\phi}} - (aX + b)$$

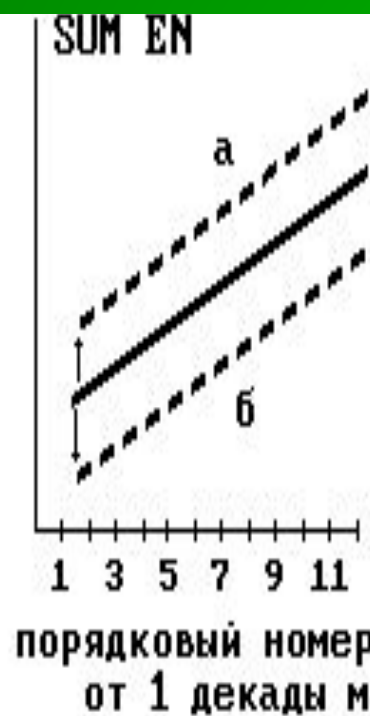


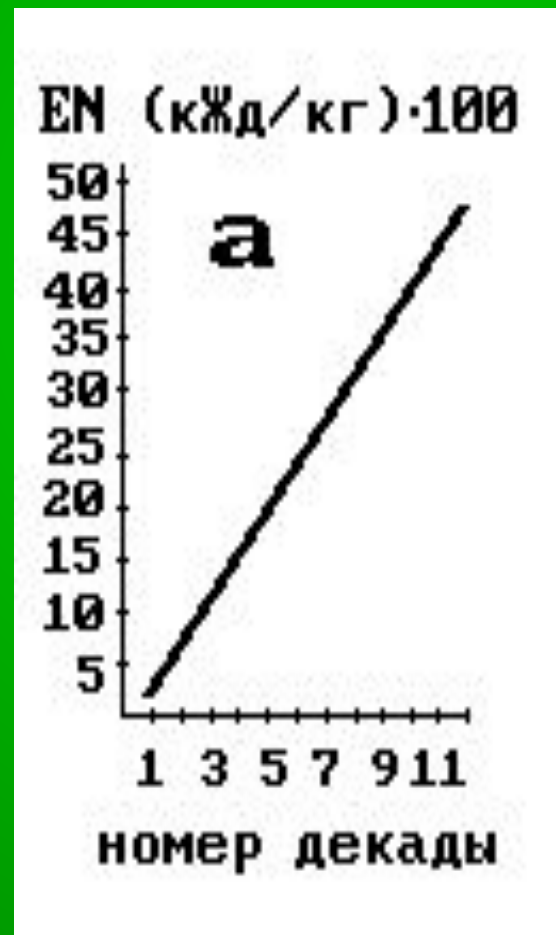
Рис.14. Отклонения от средней многолетней суммарной энтальпии воздуха в теплый (а) и холодный (б) годы (Ориг.)



## Прогноз фаз развития растений

- Когда рассчитан прогноз тепла, поступающего к растению в весенне-летний период, можно вычислить продолжительность как вегетационного периода в целом, так и каждой фазы развития в складывающихся погодных условиях конкретного года. Для этого потребуется еще один параметр: **теплоемкость фазы**, то есть *количество тепла, необходимое растению для перехода в следующую фазу развития.*

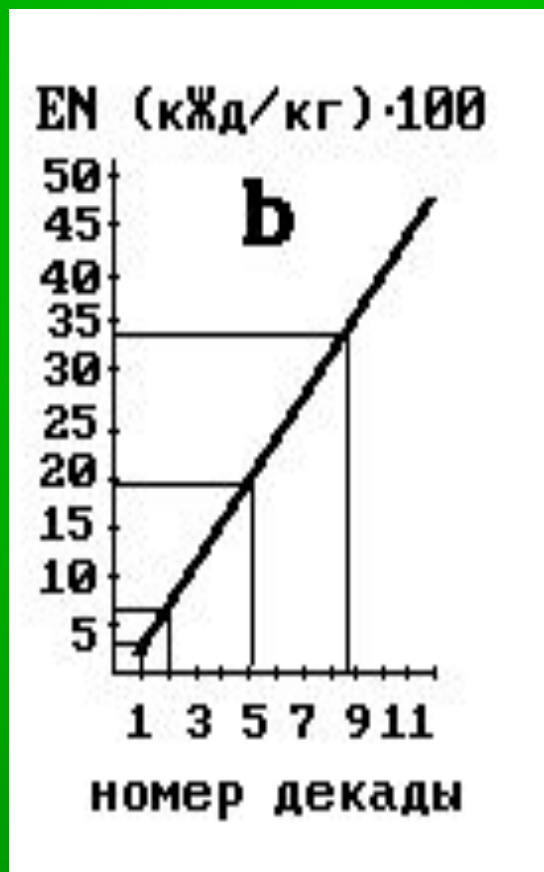
Для примера составим прогноз фаз развития ячменя  
Зазерский 85. По прогнозу от даты посева (3 мая)  
суммарная энтальпия распределилась так, как  
показано на рисунке.



Энтальпия фаз развития ячменя составляет:

- Всходы **330,2** кДж/кг,
- Начало кущения **612,6** кДж/кг,
- Колошение **2090,4** кДж/кг,
- Восковая спелость **3317,2** кДж/кг,

Зная теплоемкость фаз развития, переведем энтальпию в календарные сроки



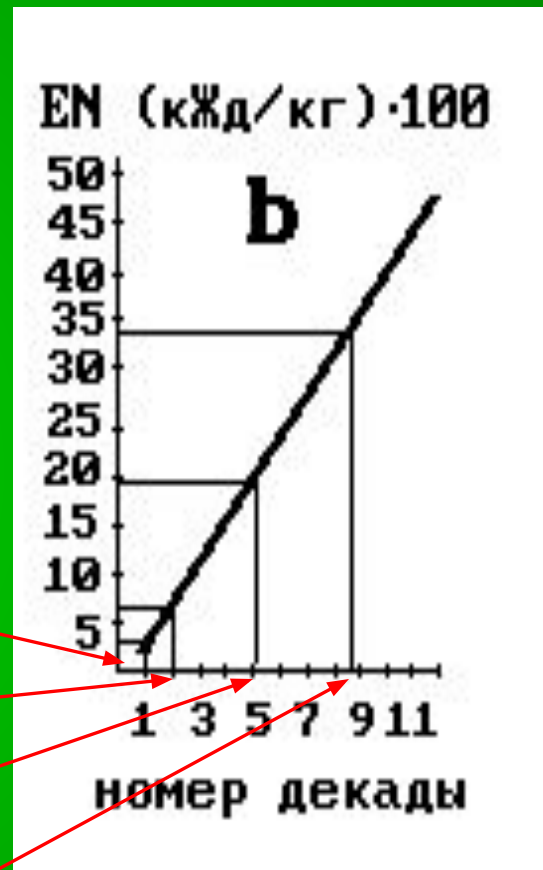
По графику находим календарные даты фаз развития:

Всходы 10 мая

Начало кущения 20 мая

Колошение 21 июня

Восковая спелость 29 июля.



**и период фотосинтетической деятельности (10 мая...29июля)**



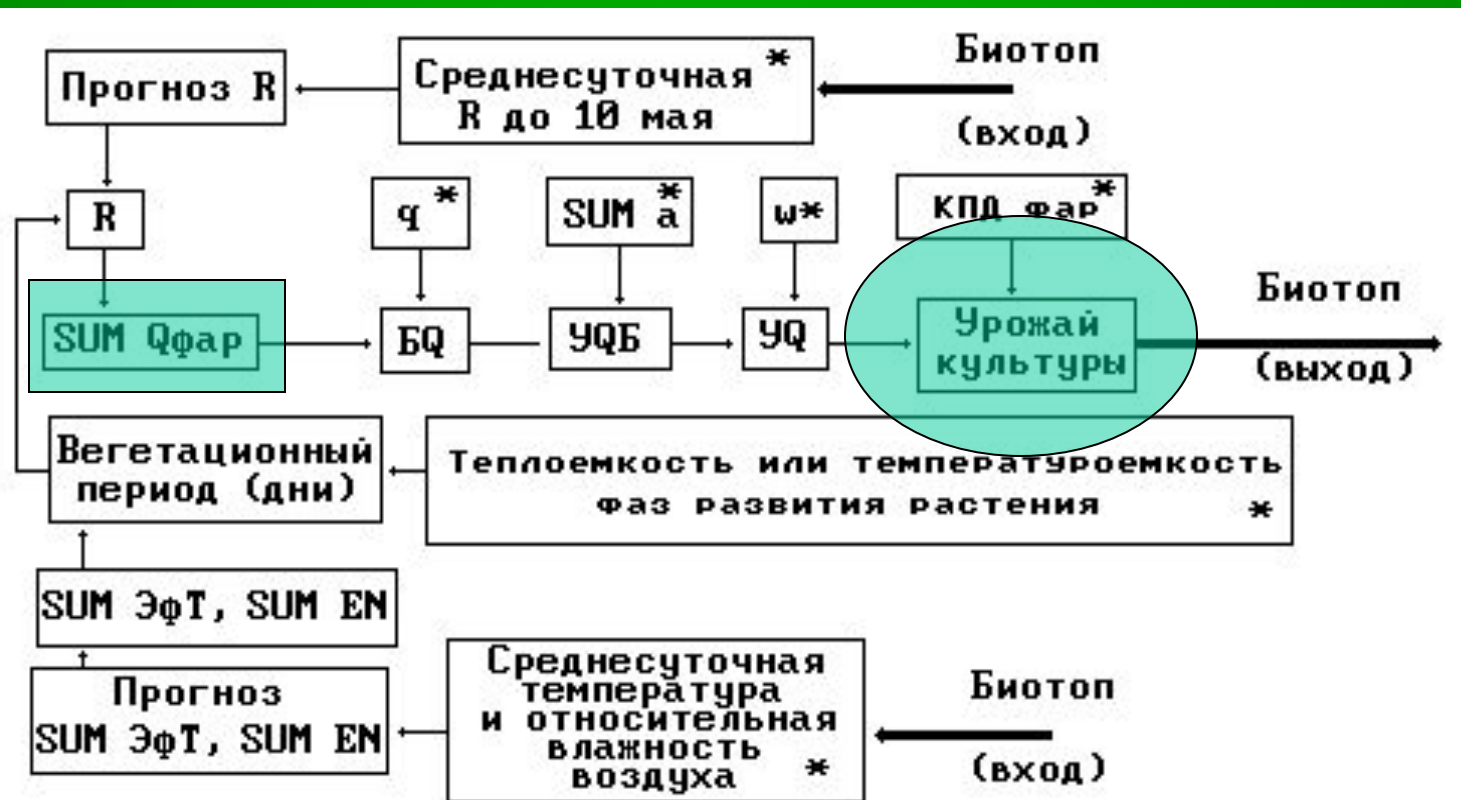


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

\_\_\_\_\_

зеленая масса и др.). Следовательно, надо ввести **соотношение основной и побочной продукции**.

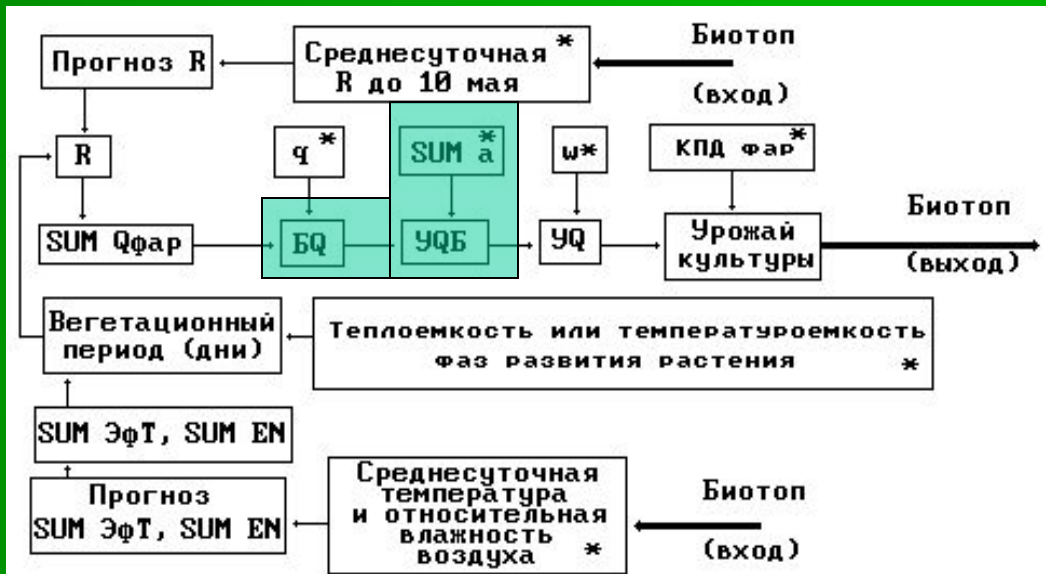


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

$$Y_{QB} = \frac{BQ}{\Sigma a}$$

Теперь приведем полученный урожай к **стандартной влажности основной продукции**, которая зависит от вида продукции (зерно 14%, корнеплоды - 80% и т. д.):

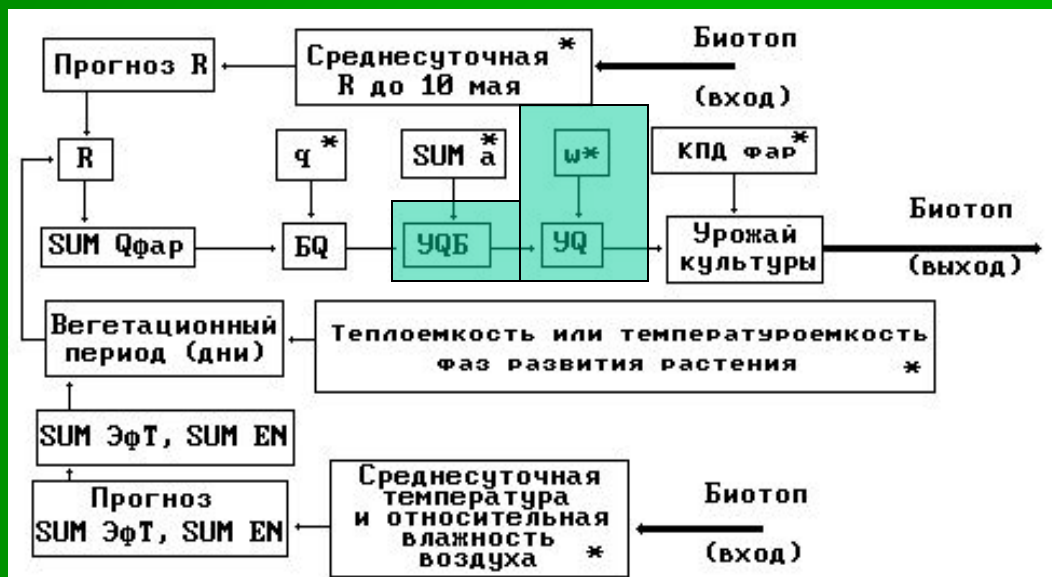
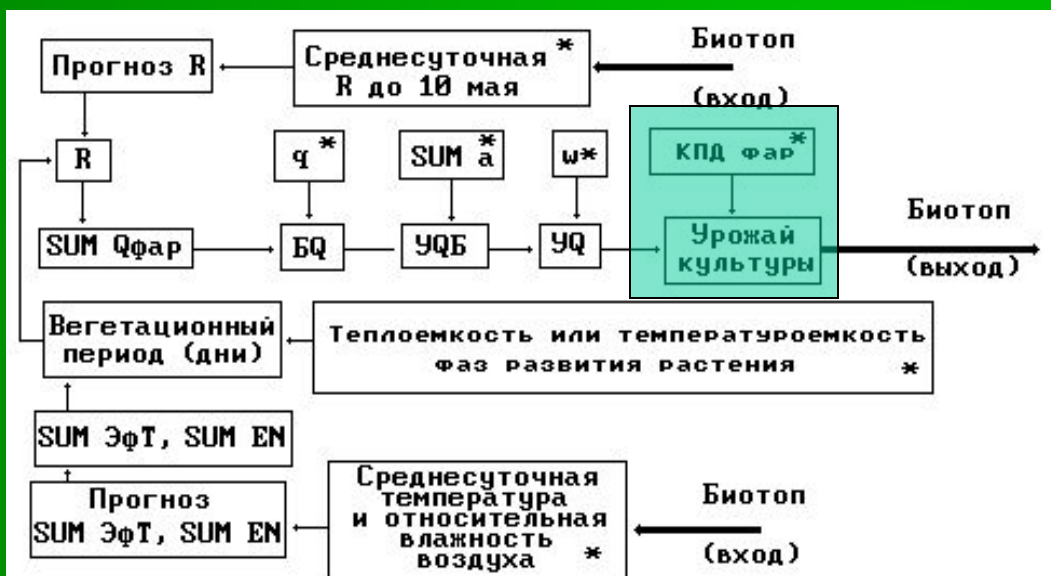


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

$$UQ = \frac{UQB \cdot 100}{100 - w}$$

В результате прогнозируется урожайность культуры при 100% использовании солнечной радиации. Но в природе этого не происходит, так как энергия ФАР расходуется не только на образование пластических веществ: часть идет на синтез АТФ, транспортировку воды, ионов и ассимилянтов, часть расходуется на дыхание. В связи с этим считается идеальным, если на производство биомассы используется 8...10% поступающей ФАР, в том числе 5...7% на формирование надземной массы. При обычной же агротехнике посевы используют только 0,5...3,0% ФАР.

С учетом **КПДфар** производственная функция урожайности (по С.А. Образцову, 1992), или **величина первого уровня продуктивности** (по Р.А. Полуэктову, 1991), принимает вид:



$$Y = YQ \cdot \text{КПДфар}$$

Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

Этот уровень урожайности имеет **самостоятельный выход**, но может служить **входом** на другие модули производственной функции.

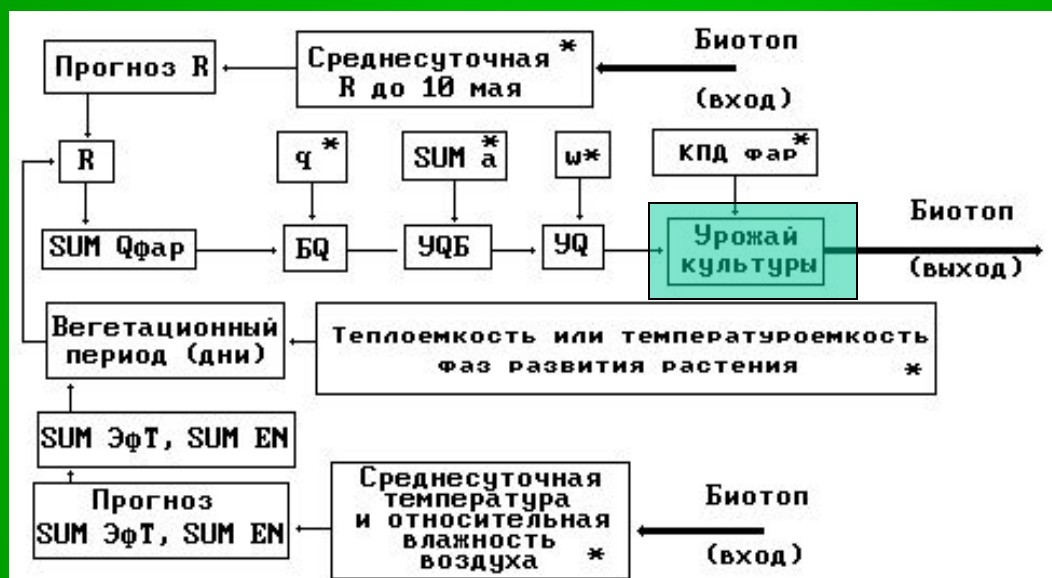


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

**Благодарю за внимание!**