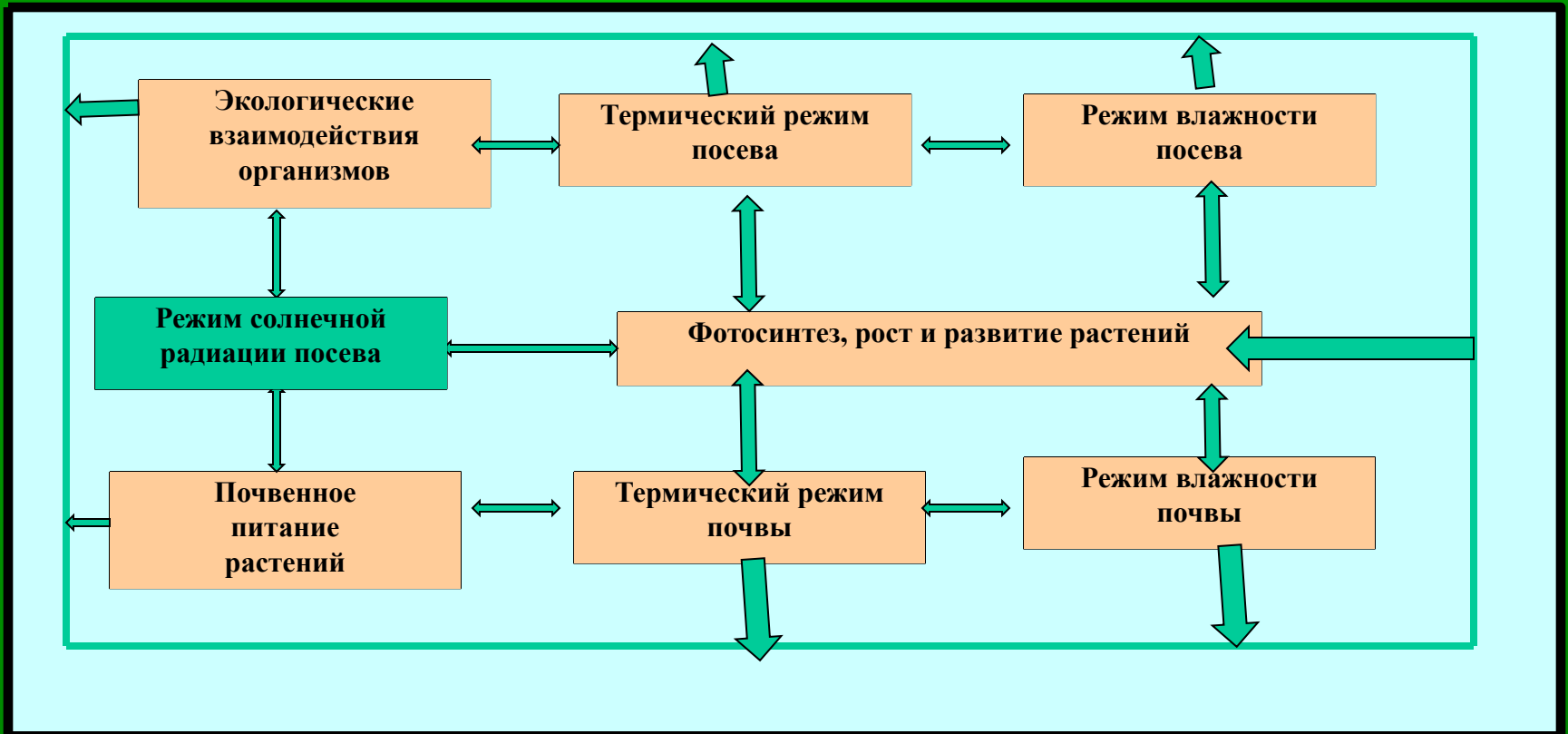


## Лекция 3

# РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЭКОСИСТЕМЫ



Основным  
энергетическим фактором  
большинства экосистем  
является  
солнечная радиация.

## *Лекция 3*

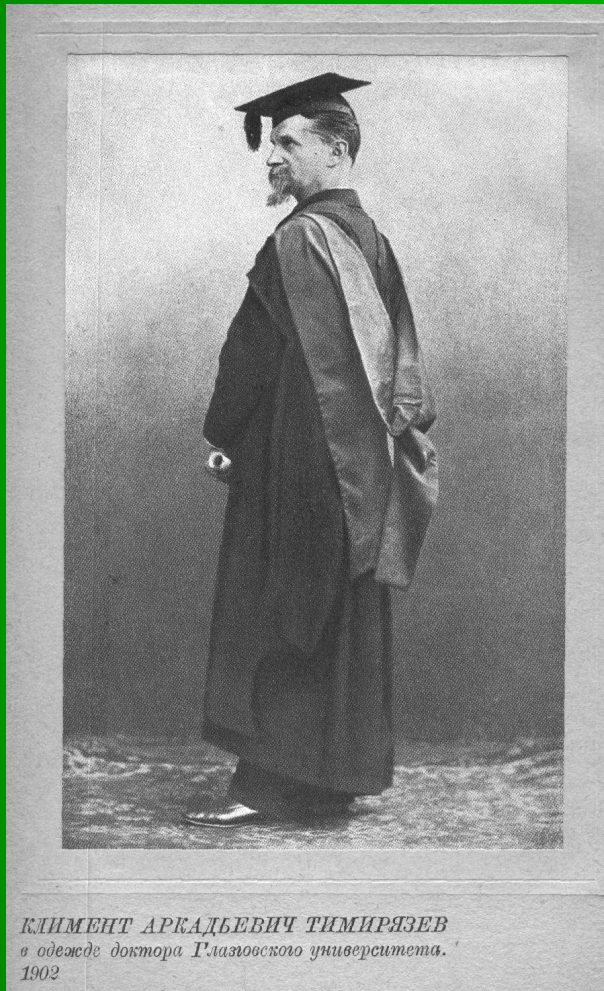
# РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЭКОСИСТЕМЫ

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

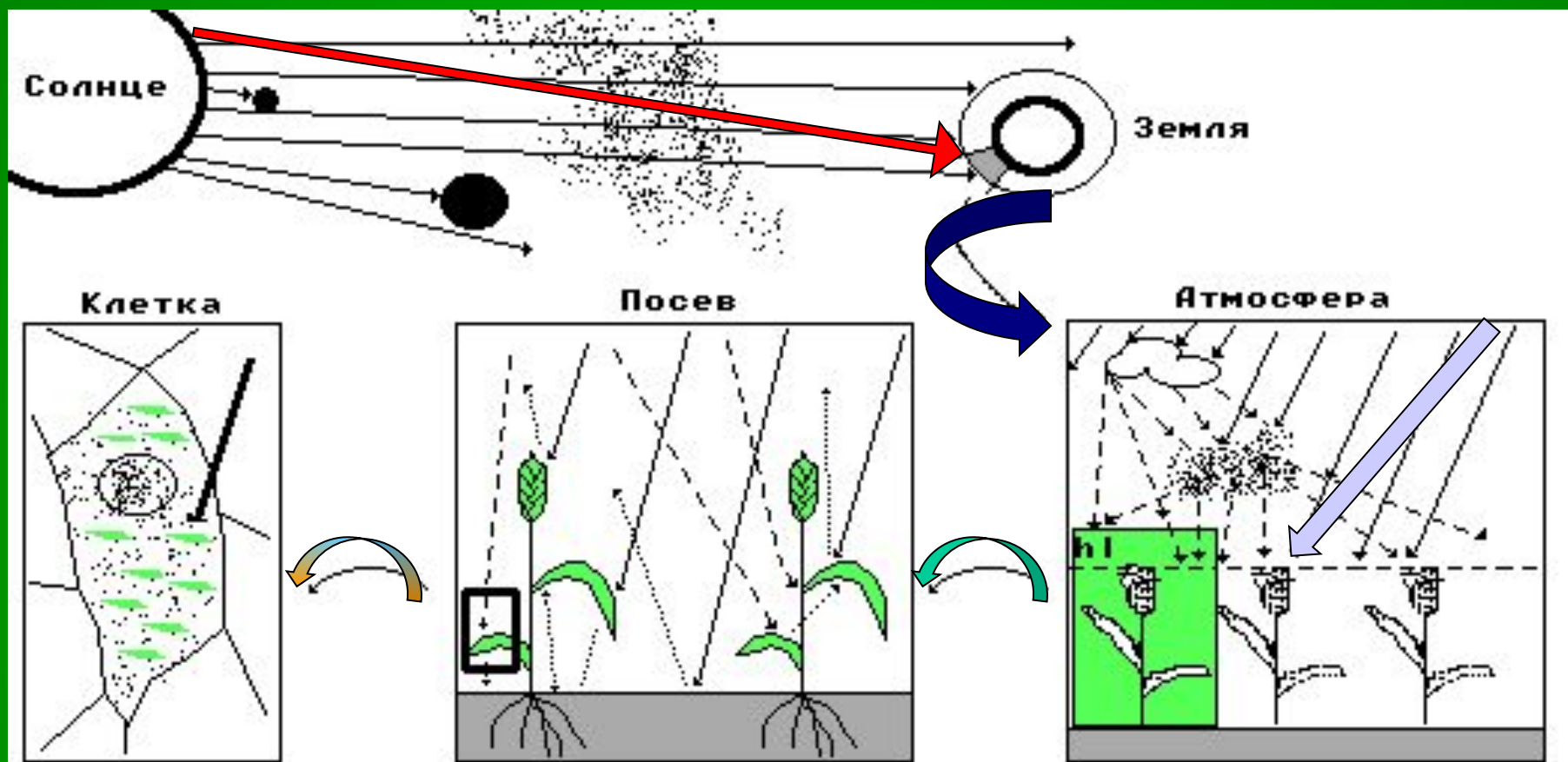
# СОЛНЦЕ КАК ОСНОВНОЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛА И СВЕТА ДЛЯ РАСТЕНИЯ

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%.

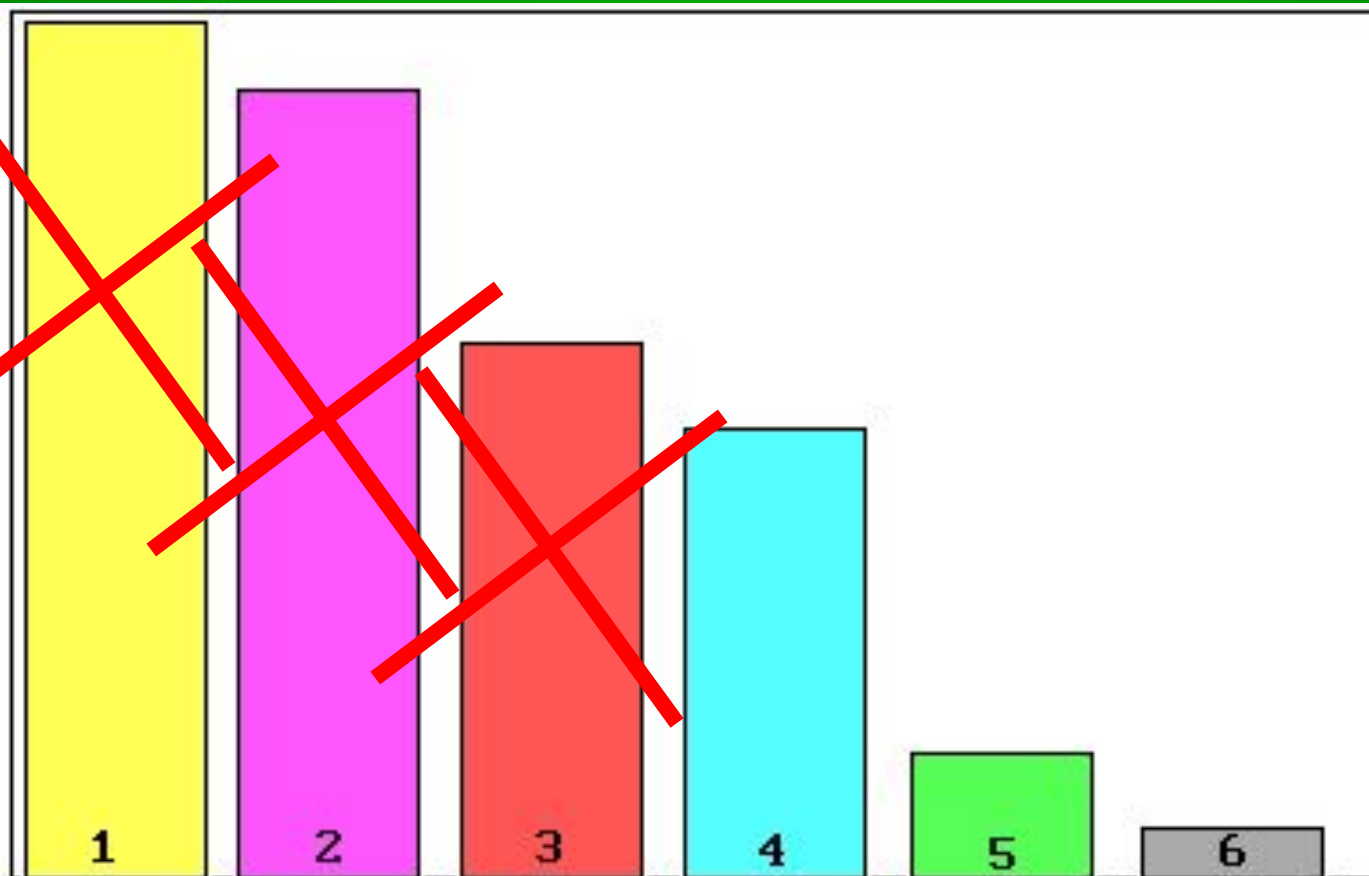
Поэтому-то русский физиолог К.А. Тимирязев в основу плодородия почвы, а, следовательно, и урожайности культур ставил не количество внесенных удобрений, не количество полученной влаги, а именно солнечную энергию.



*КЛИМЕНТ АРКАДЬЕВИЧ ТИМИРЯЗЕВ  
в одежде доктора Глазовского университета.  
1902*



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

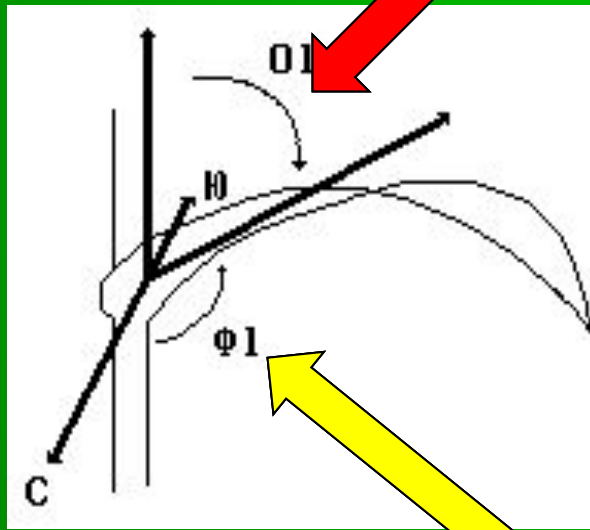
- это архитектоника

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" ( $\theta$ )**



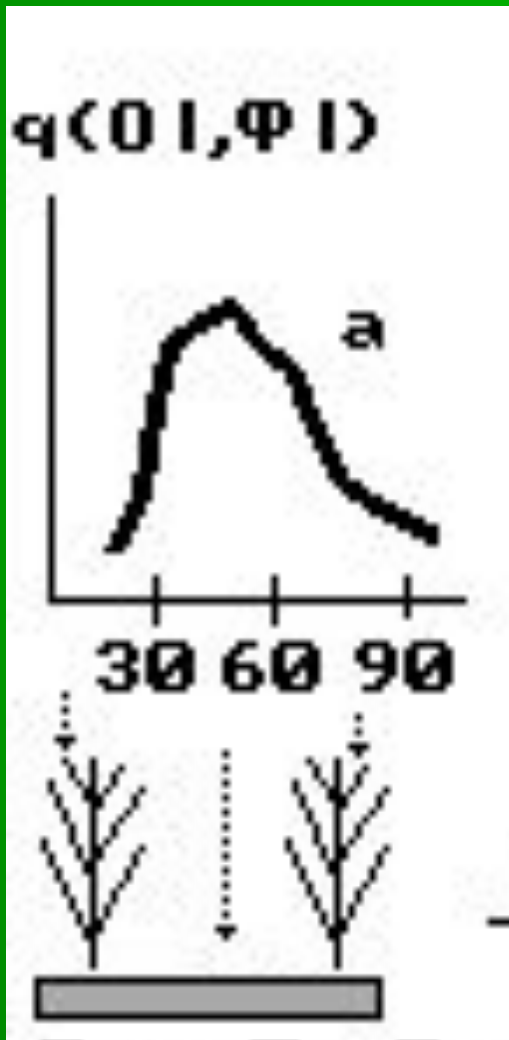
**Рис.4. Углы для характеристики ориентации листьев в пространстве (по Р.А.Полуэктову)**

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

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.



# ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ВЕРТИКАЛЬНОЕ расположение листьев

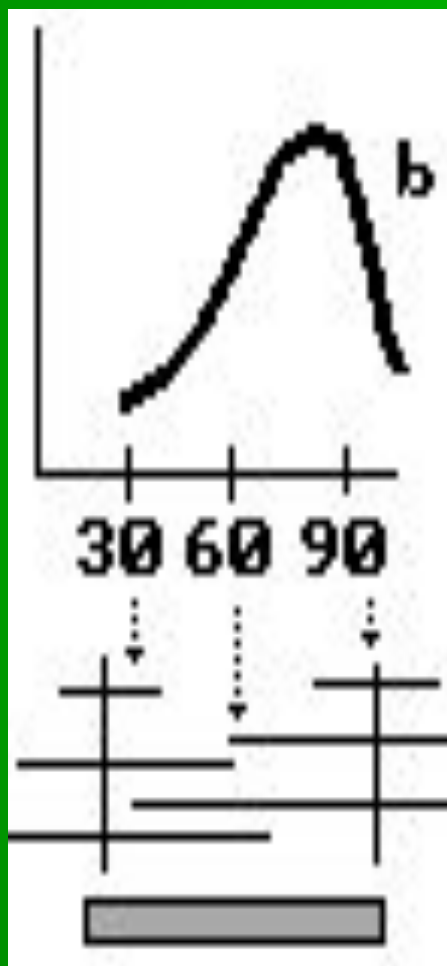


+ лучи освещают все ярусы  
листьев

— значительная часть лучей  
попадает на почву

# ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ

расположение листьев



+ листья верхнего яруса  
находятся в условиях хорошего  
освещения

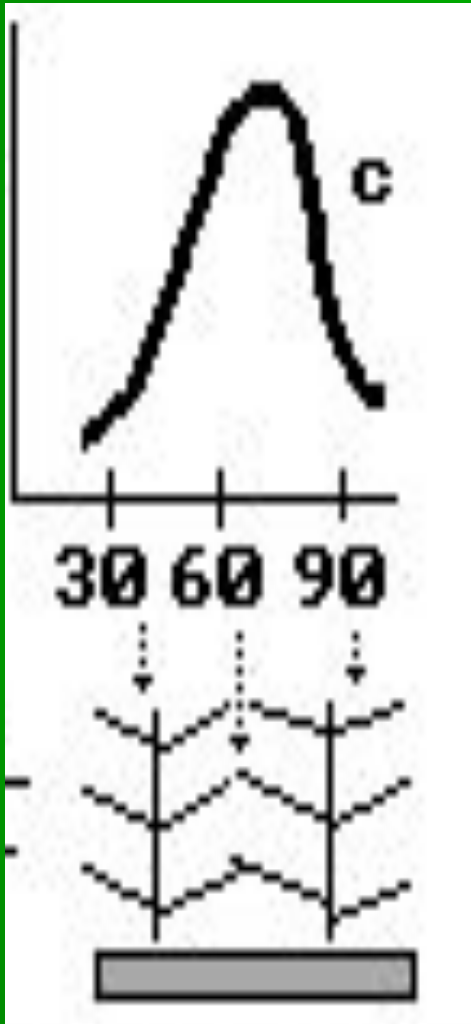
— листья верхних ярусов  
затеняют нижние

— нижние листья отмирают

— общая площадь листового  
аппарата уменьшается

# ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ПРОМЕЖУТОЧНОЕ

расположение листьев

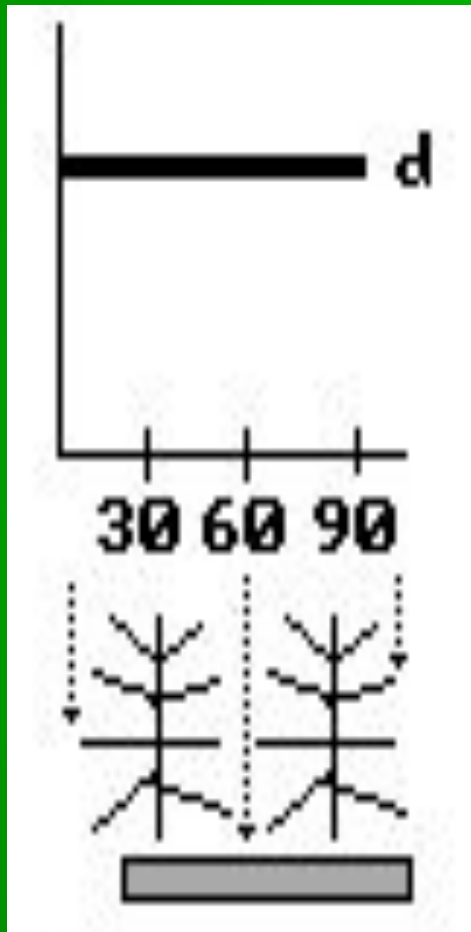


+ листья верхнего яруса  
находятся в условиях хорошего  
освещения

— листья верхних ярусов частично  
затеняют нижние

# СФЕРИЧЕСКОЕ

расположение листьев

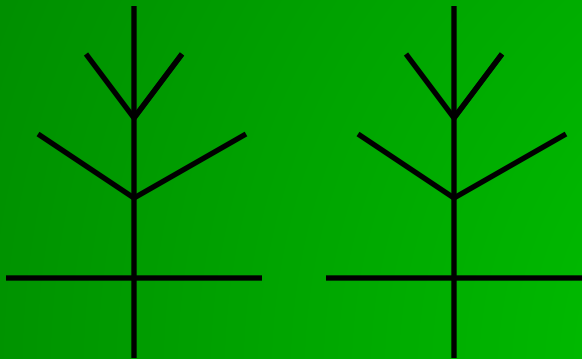


+ листья находятся в условиях  
хорошего освещения

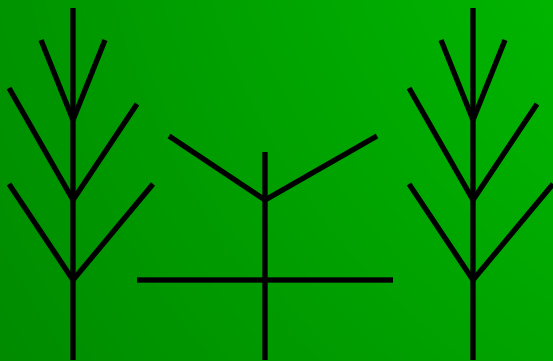
— характерно для деревьев и  
кустарников



# 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**

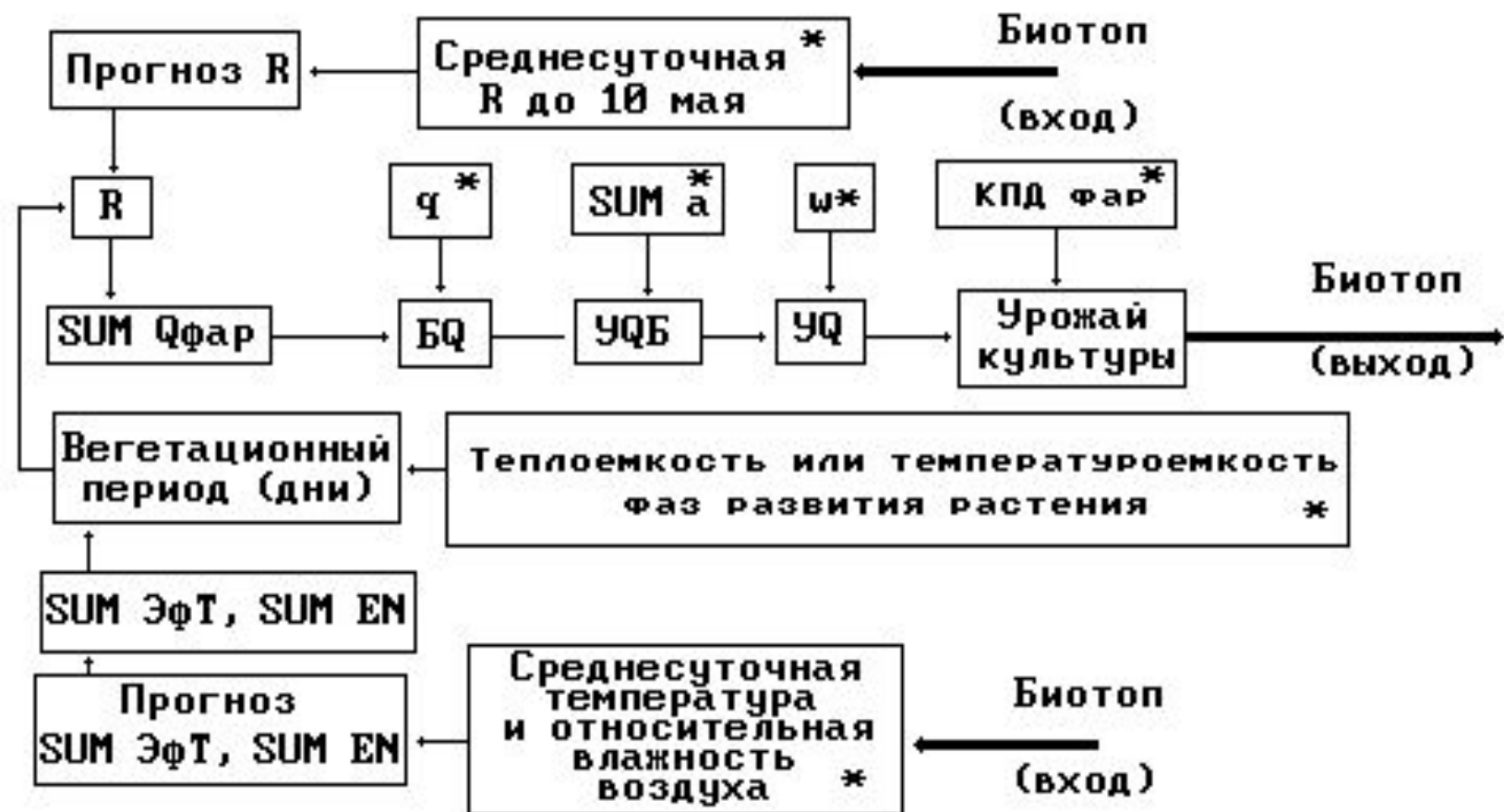
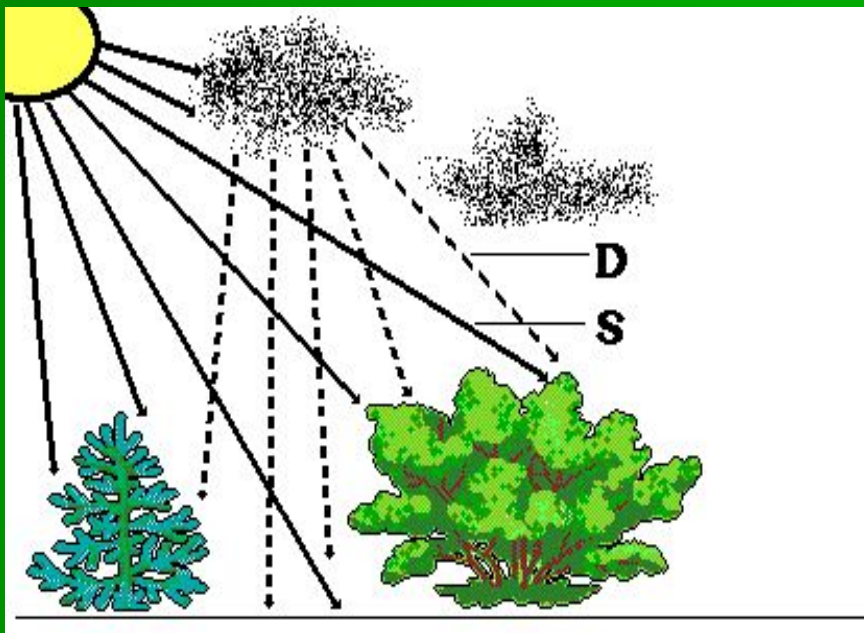


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

# Прогноз среднесуточной интегральной радиации



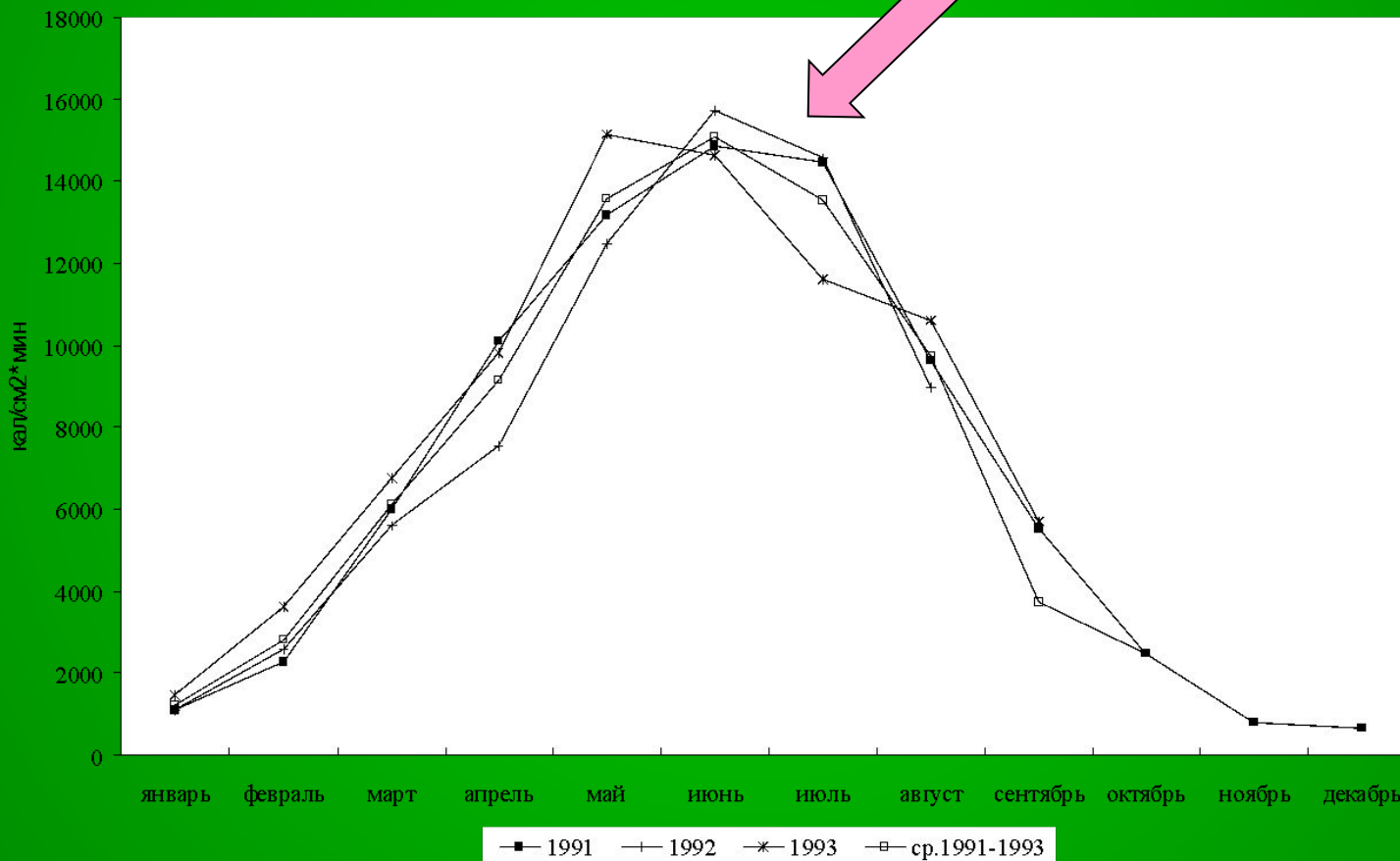
- **Прямая солнечная радиация** - это часть лучистой энергии солнца, поступающая к земле в виде почти параллельных лучей. Обозначается она  $S$  и имеет размерность  $\text{кДж}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ .
  - **Рассеянная солнечная радиация** - часть солнечной радиации, падающая на горизонтальную 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:

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

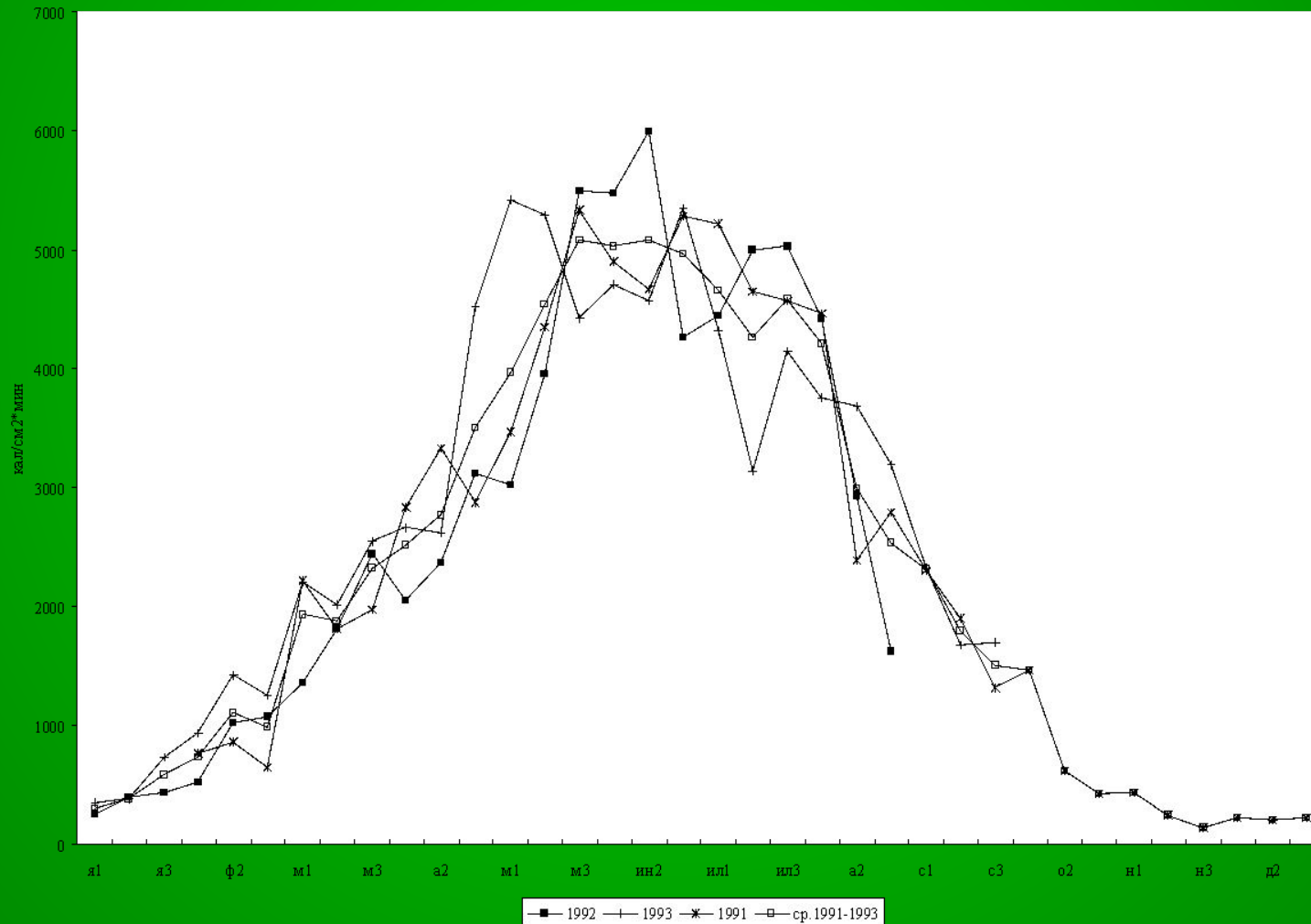
где  $h_o$  - угловая высота Солнца над горизонтом, измеряемая в радианах. 19

**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.

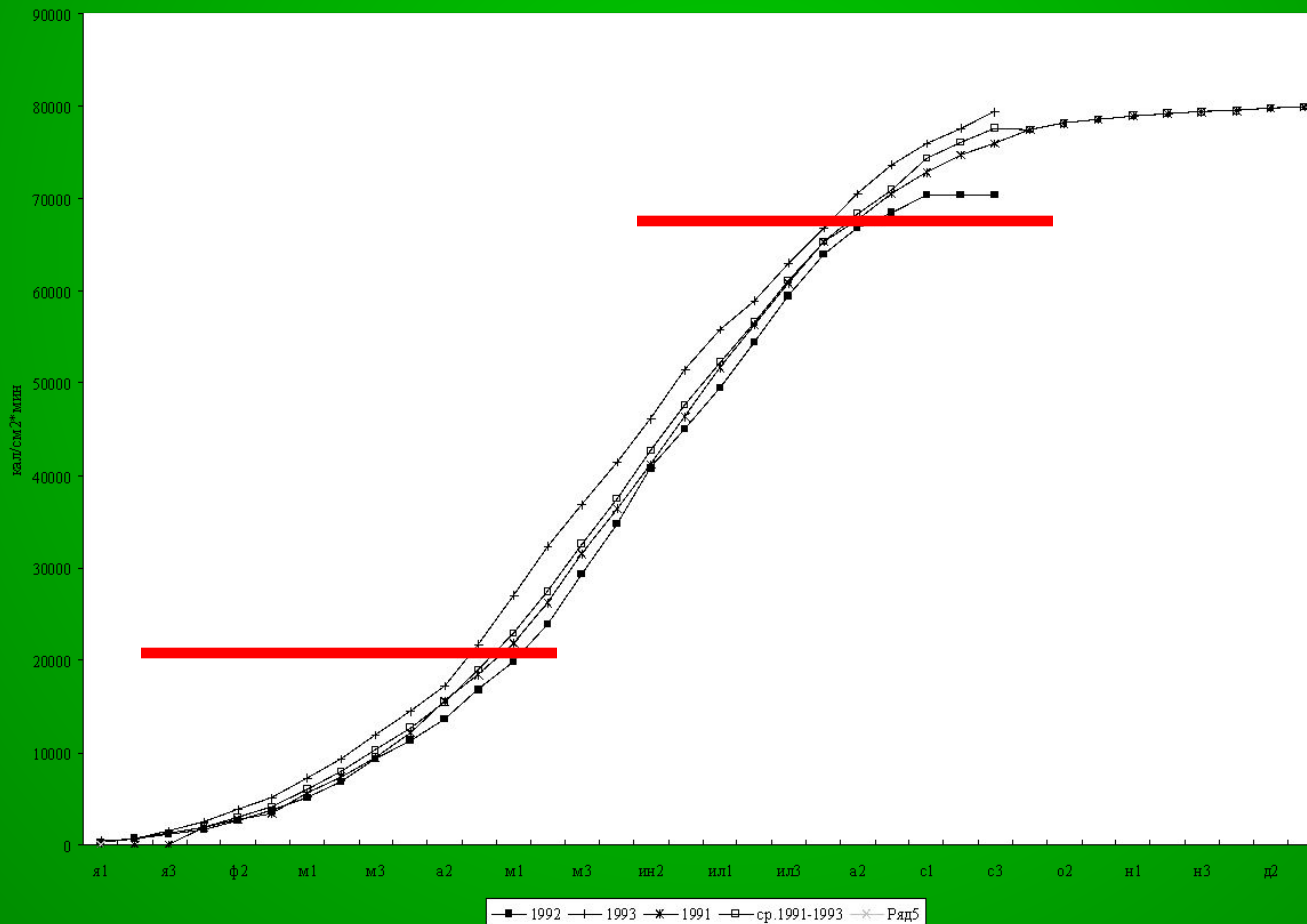


При более мелком дроблении шкалы времени процесс становится еще сложнее, так как колебания динамики по декадам выражены гораздо сильнее.

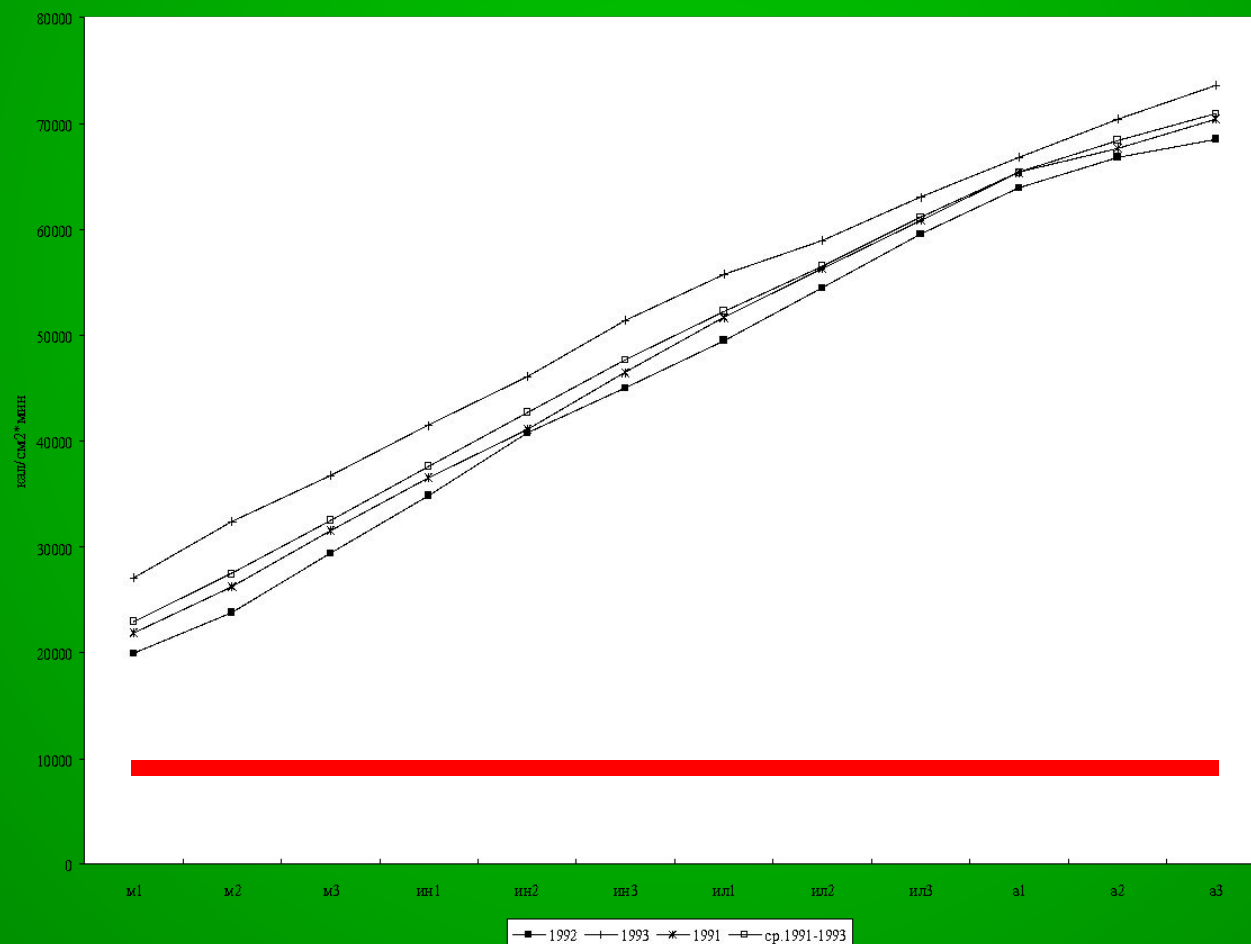




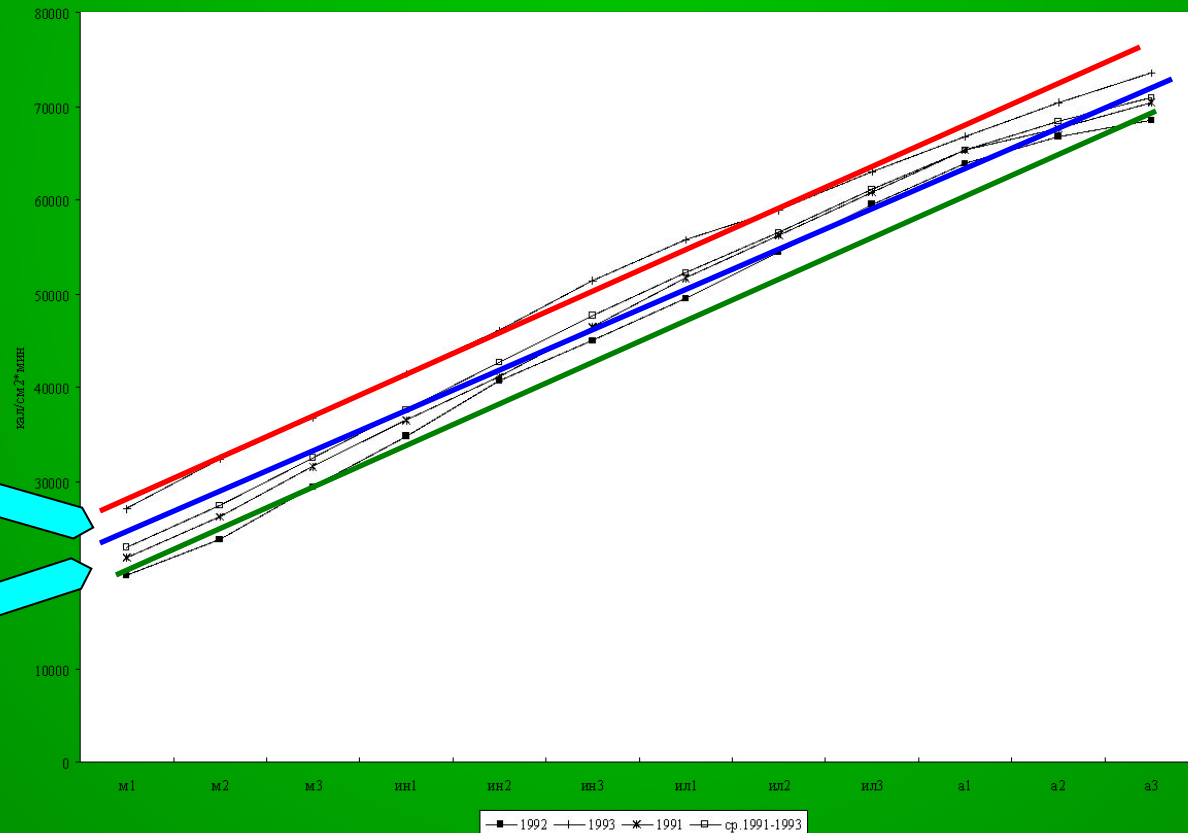
**Если суммировать R с нарастающим итогом, получаются S-образные линии, расходящиеся, в зависимости от условий года, от 10 января до 10 мая, параллельные от 10 мая до 31 августа и несколько расходящиеся к декабрю.**



**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 ( $R_f$ ) и среднемноголетним ( $R_{см}$ ):

$$R' = R_f - R_{см}$$

Объединив уравнения, получим:

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

где  $R'=0$ , если  $R_f = R_{см}$ ;

$R'>0$ , если  $R_f > R_{см}$ ;

$R'<0$ , если  $R_f < R_{см}$ .

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

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

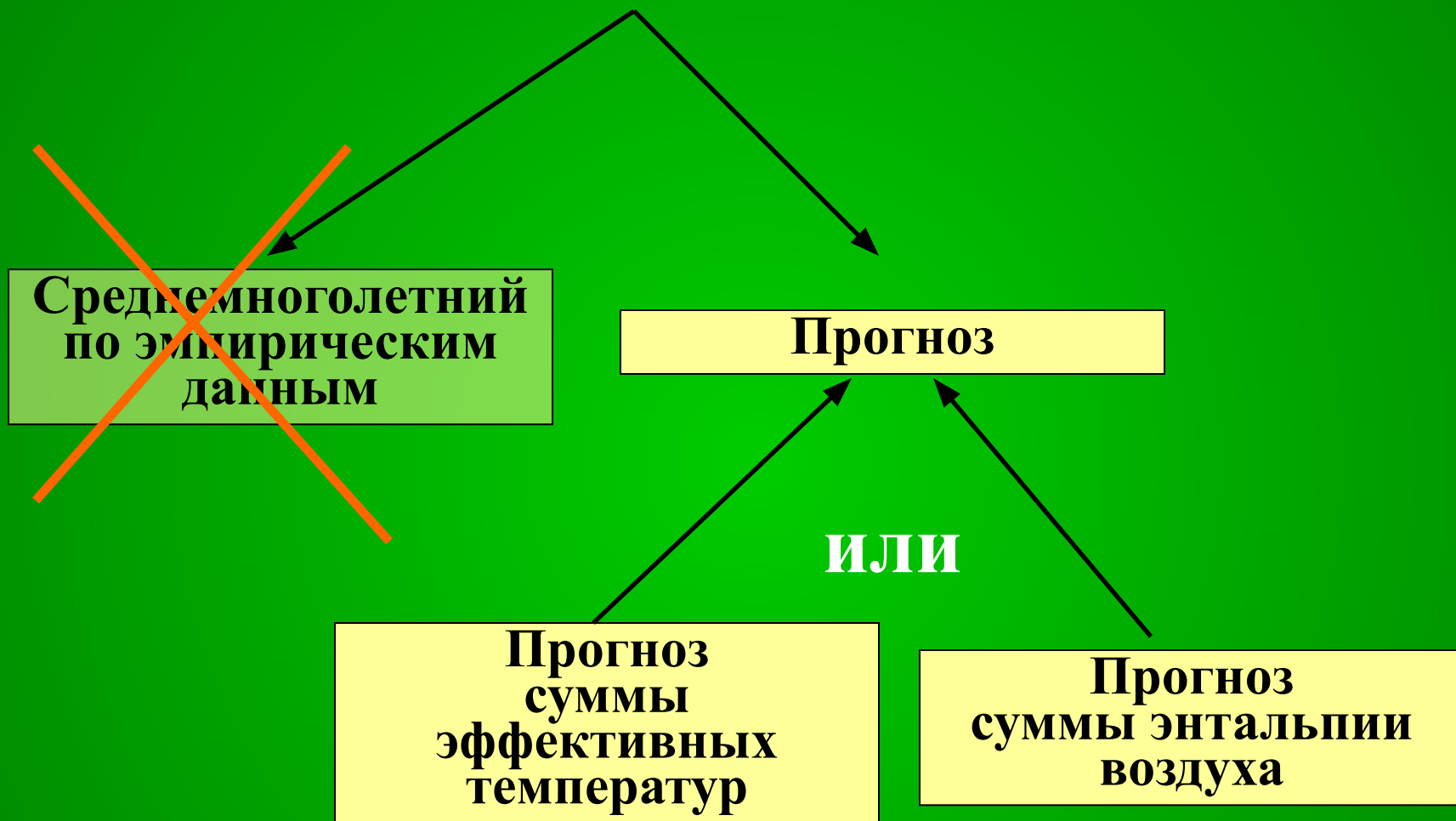
остальные 48% – это длинноволновая радиация, обеспечивающая тепловой режим экосистемы.

**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**.*

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

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

$$\Sigma T_{\text{эф}} = ax + b + T'$$

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

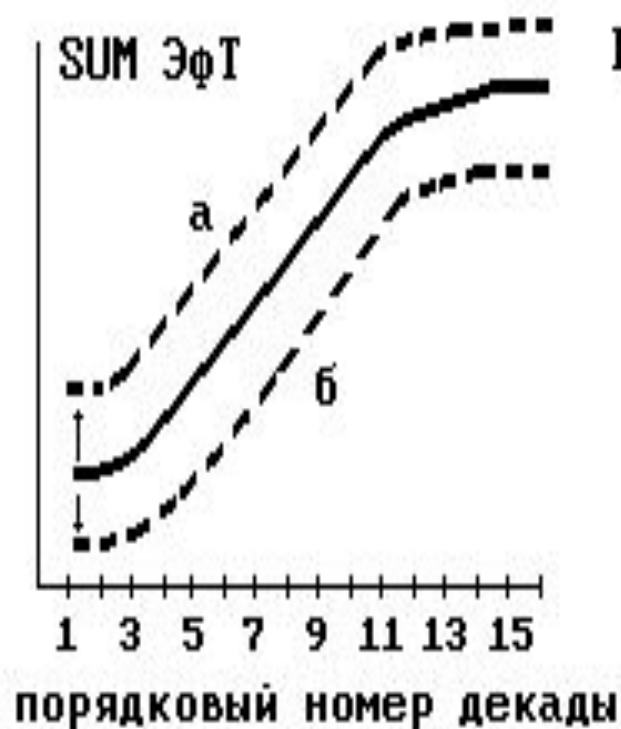


Рис.13. Отклонения от средней многолетней суммы эффективных температур в теплый (а) и холодный (б) годы (Ориг.)

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

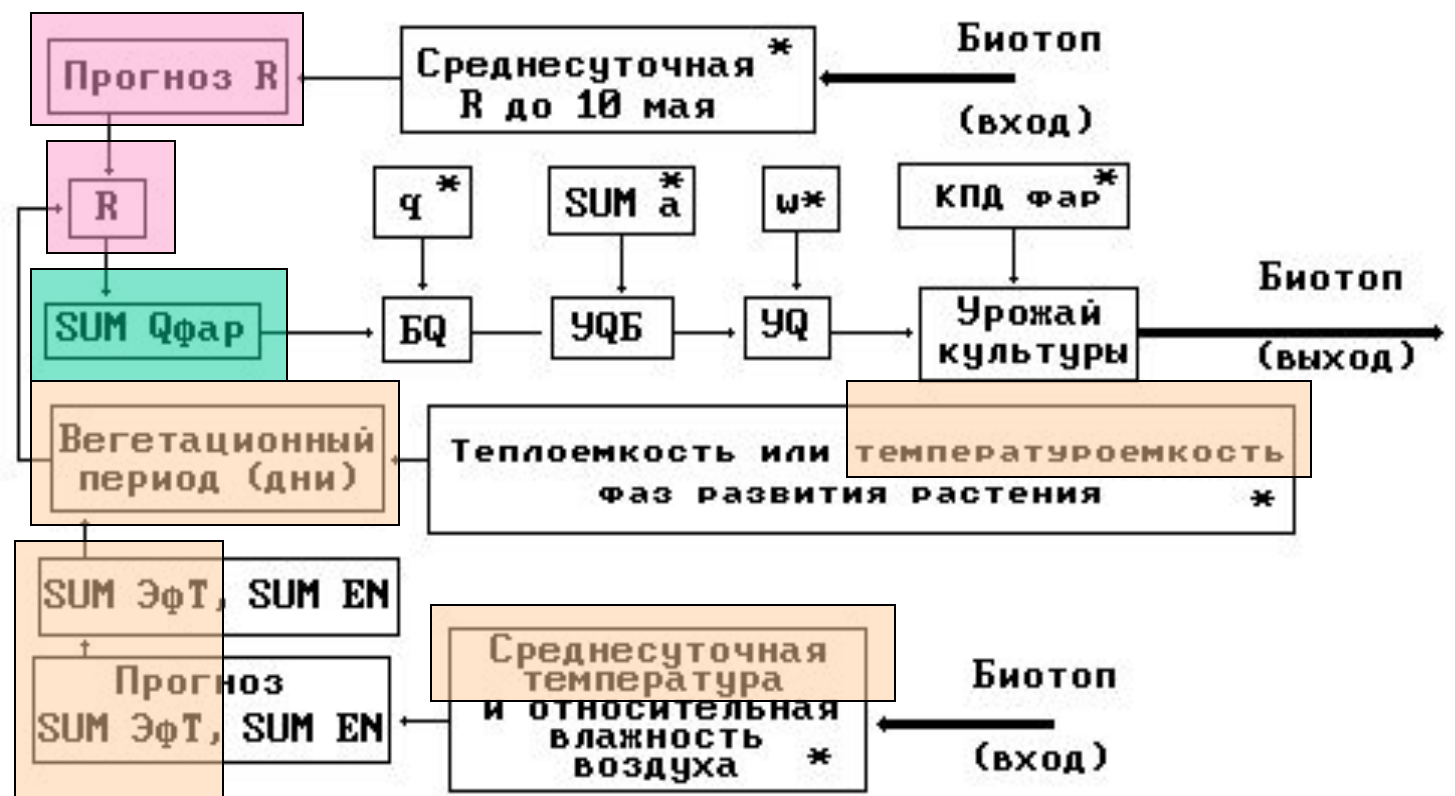


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

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**:

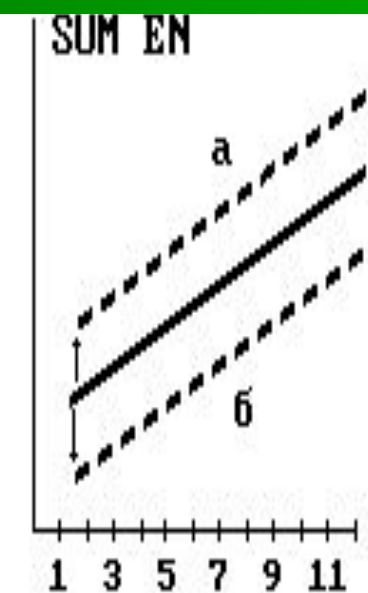
$$C_p = \frac{0,24 \cdot t_{cp} + 0,001 \cdot (622 \cdot (0,01 \cdot f \cdot q))}{(P - 0,01 \cdot f \cdot q) \cdot (595 + 0,46 \cdot t_{cp})}$$

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

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

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





порядковый номер декады  
от 1 декады мая

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

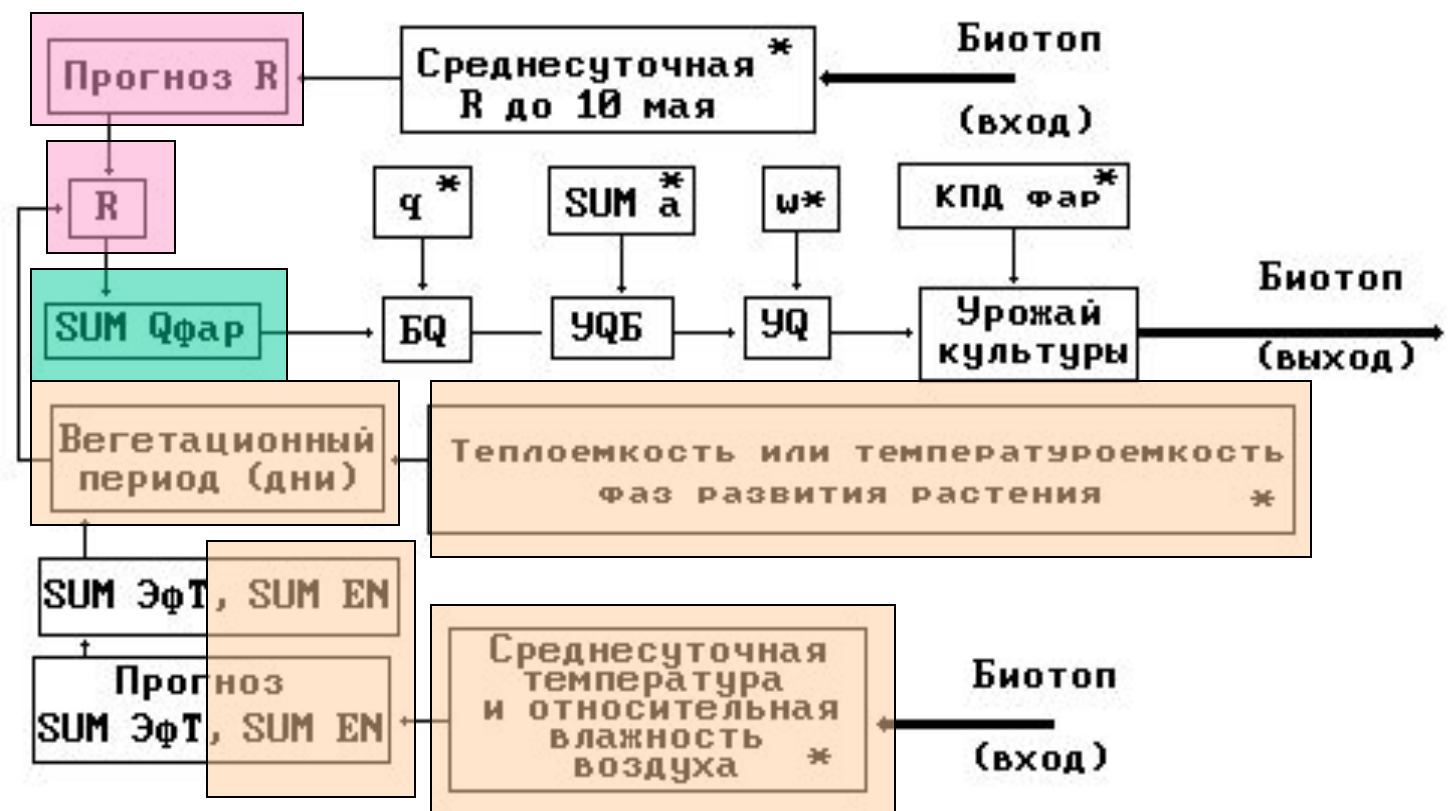
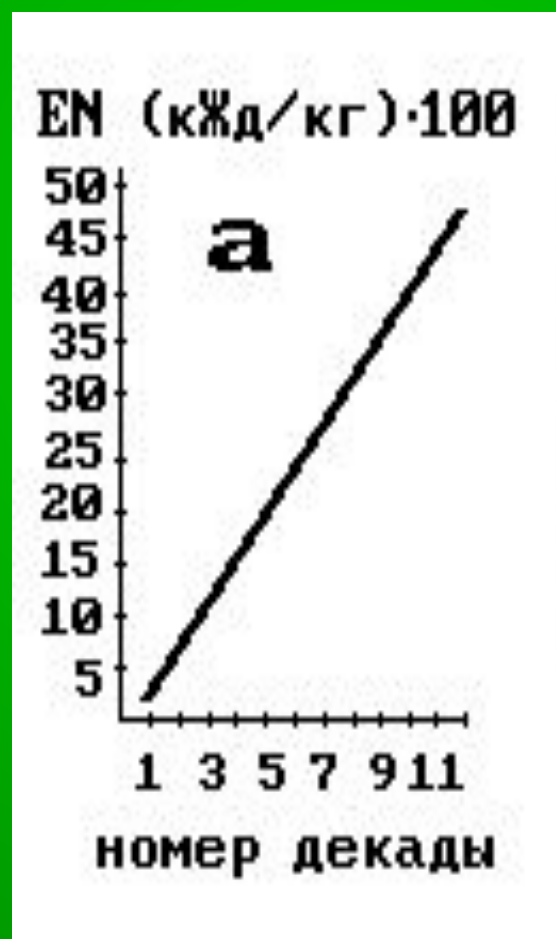


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

## 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.*

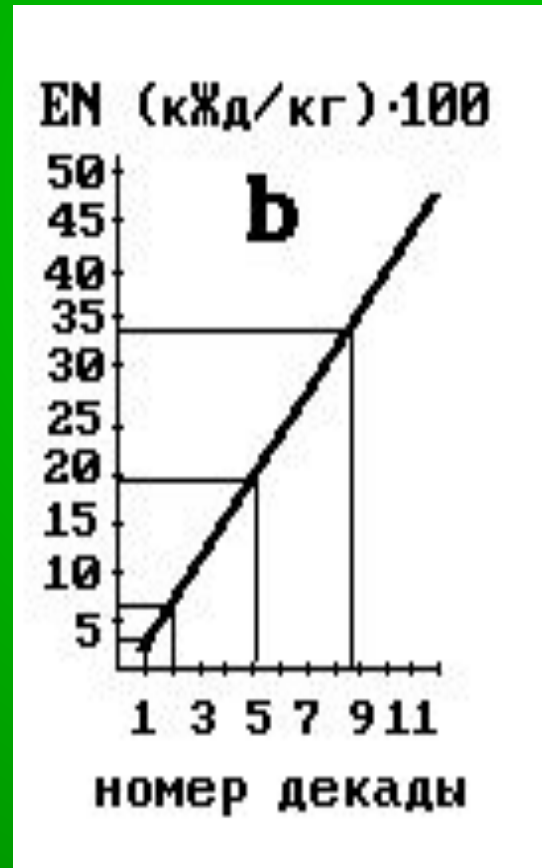
Для примера составим прогноз фаз развития ячменя Зазерский 85. По прогнозу от даты посева (3 мая) суммарная энтальпия распределилась так, как показано на рисунке.



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



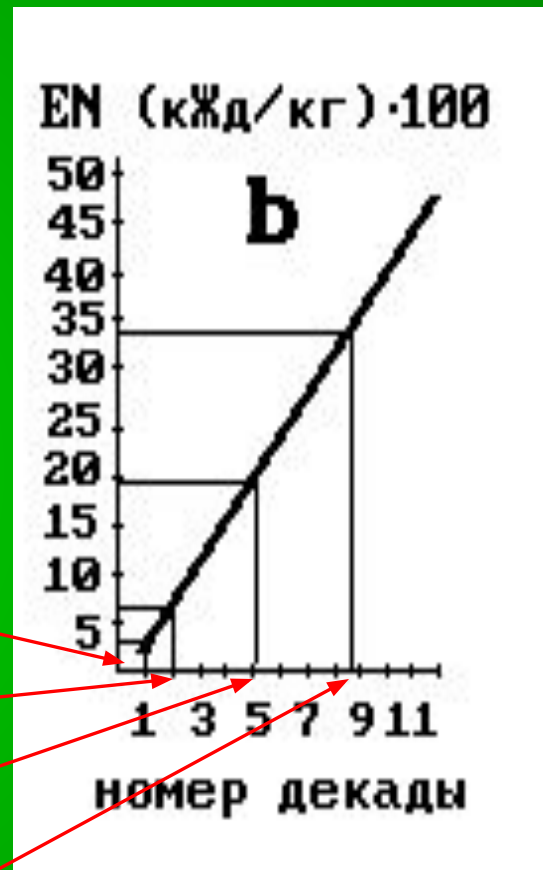
## По графику находим календарные даты фаз развития:

**Всходы** 10 мая

**Начало кущения** 20 мая

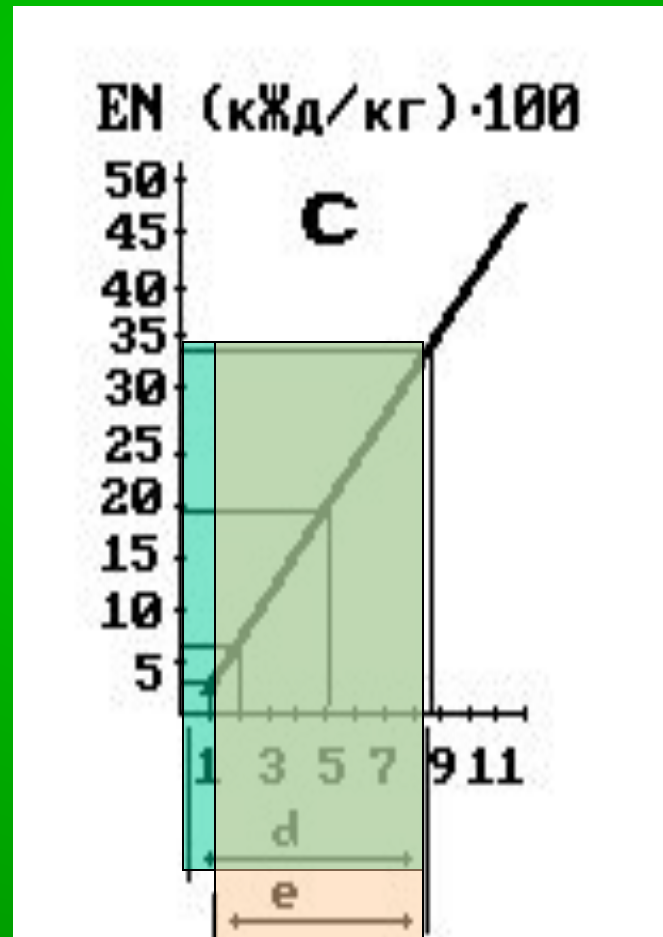
**Колошение** 21 июня

**Восковая спелость** 29 июля.



Теперь уже несложно установить период вегетации (3 мая..29 июля)

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



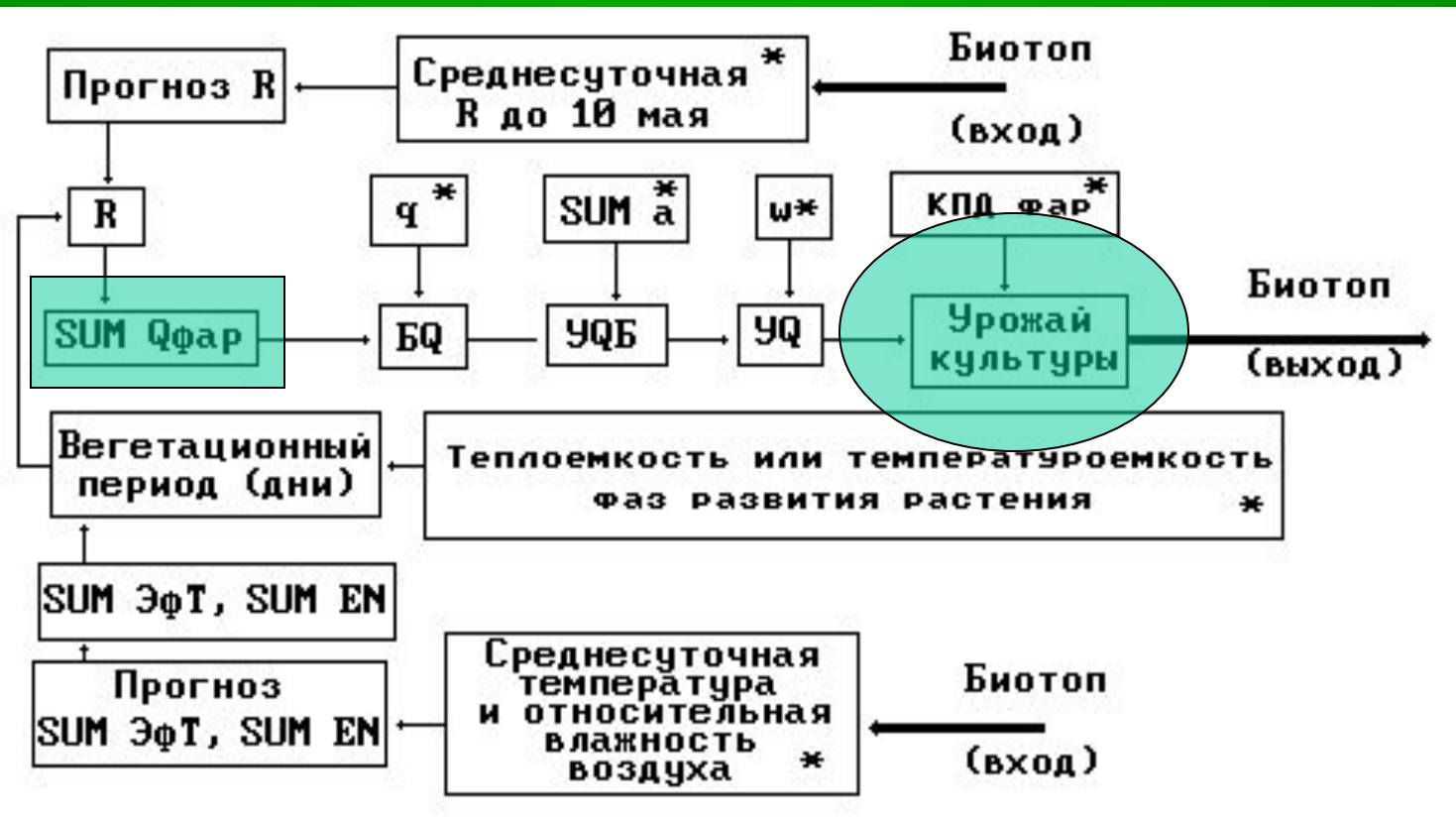


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.



Вначале вычисляется общая биомасса (корни и надземные органы) (BQ) при нулевой влажности, то есть абсолютно сухое вещество, по формуле:

$$BQ = \frac{10000 \cdot \sum Q_{\text{фар}}}{q}$$

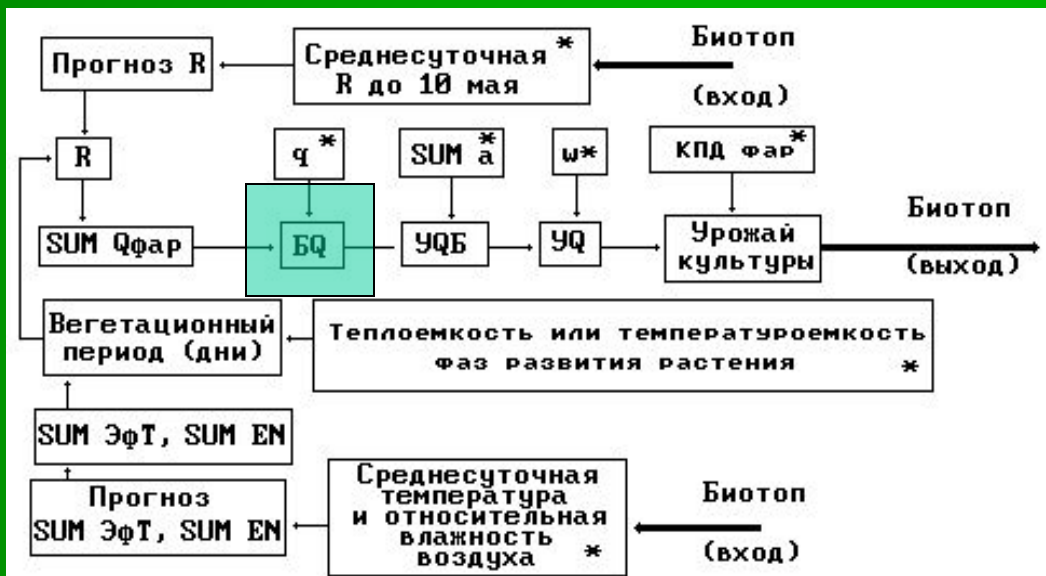
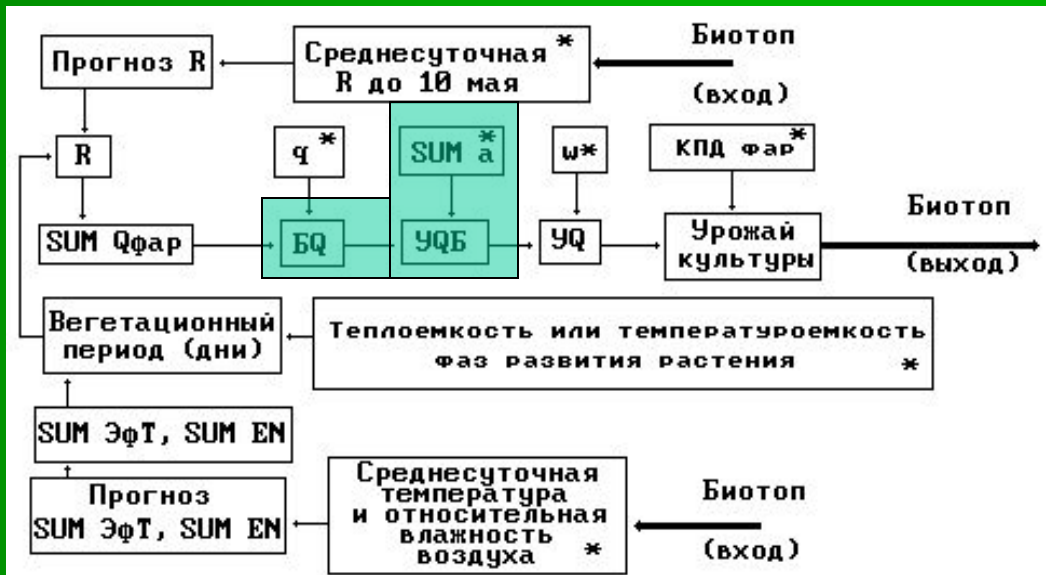


Рис.6. Структурная схема модели первого уровня продуктивности (Ориг.). \* – предикторы модели.

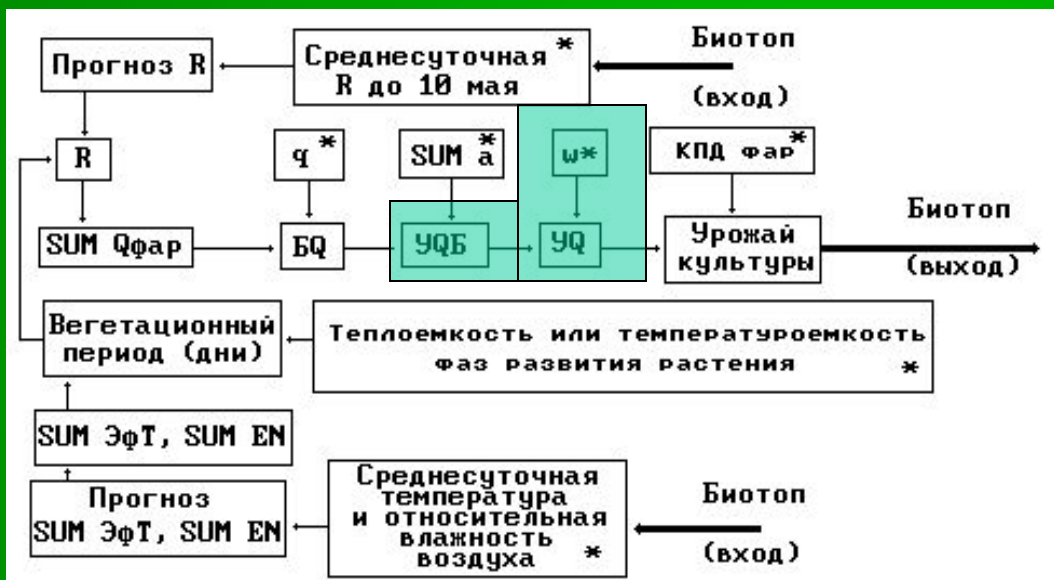
Но количество биомассы - это еще не совсем урожай, поскольку обычно используется только часть ее (корнеплоды, семена, зеленая масса и др.). Следовательно, надо ввести **соотношение основной и побочной продукции**.



$$УQB = \frac{БQ}{\Sigma a}$$

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

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

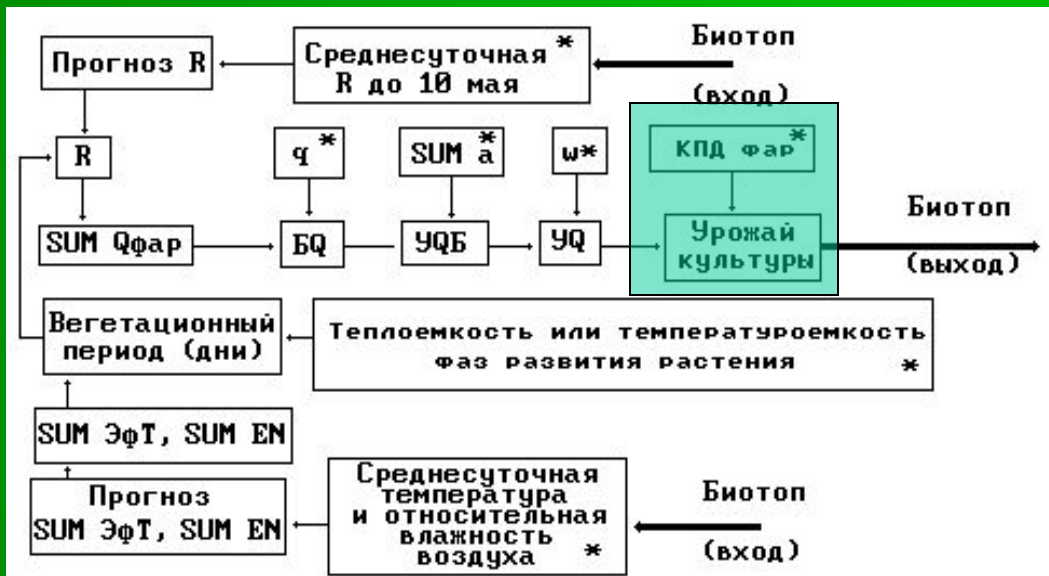


$$UQ = \frac{UQB \cdot 100}{100 - w}$$

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

**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:



$$Y = UQ \cdot \text{КПДфар}$$

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!**