***Лекция 6***

# ПРОГНОЗ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСТЕНИЙ

## ЗНАЧЕНИЕ ФОТОСИНТЕЗА В ЖИЗНИ РАСТЕНИЯ

В книге «Солнце, жизнь и хлорофилл» К.А. Тимирязев писал: «Когда-то, где-то на землю упал луч Солнца, но он упал не на бесплодную почву, он упал на зеленую былинку пшеничного ростка, или, лучше сказать, на хлорофилловое зерно. ударяясь о него, он потух, перестал быть светом, но не исчез. Он только затратился на внутреннюю работу, он рассек, разорвал связь между частицами углерода и кислорода, соединенными в углекислоте. Освобожденный углерод, соединяясь с водой, образовал крахмал. Этот крахмал, превратясь в растворимый сахар, после долгих странствий по растению отложился, наконец, в зерне в виде крахмала же или в виде клейковины. В той или другой форме он вошел в состав хлеба, который послужил нам пищей. Он преобразился в наши мускулы, в наши нервы. И вот теперь атомы углерода стремятся в наших организмах вновь соединиться с кислородом, который кровь разносит во все концы нашего тела. При этом луч солнца, таившийся в них в виде химического напряжения, вновь принимает форму явной силы. Этот луч солнца согревает нас. Он приводит нас в движение. Быть может в эту минуту он играет в нашем мозгу».

Таким образом, фотосинтез является важнейшей физиологической функцией хлорофиллсодержащих растений, обеспечивающий процесс трансформации вещества и энергии биосферы.

Интенсивность фотосинтеза зависит от поглощенной ФАР, концентрации СО2 в прилистном слое атмосферы и устьично-кутикулярного сопротивления (рисунок 62). Согласно методике P.А. Полуэктова (1991) расчет ведется по формуле:

|  |
| --- |
| Lji |

|  |
| --- |
| SSlj |

|  |
| --- |
| Ca(tk) \* |

|  |
| --- |
| Ca(tk+1) |

|  |
| --- |
| Ci |

|  |
| --- |
| ku \* |

|  |
| --- |
| Dc |

|  |
| --- |
| rst \* |

|  |
| --- |
| Dt \* |

|  |
| --- |
| rx \* |

|  |
| --- |
| rc |

|  |
| --- |
| Qr \* |

|  |
| --- |
| αн \* |

|  |
| --- |
| Фmax \* |

|  |
| --- |
| rm \* |

|  |
| --- |
| М'gen(tk)\*  М'l(tk)\*  М'r(tk)\*  М'st(tk)\* |

|  |
| --- |
| Рис.62.. Структурная схема модуля роста и развития растений. внутренние связи; внешние связи; \* предикторы модуля. |

|  |
| --- |
| Модуль радиационного режима посева |

|  |
| --- |
| Модуль режима влажности почвы |

|  |
| --- |
| Модуль агротехники |

|  |
| --- |
| Модуль температуры и влажности в посеве |

|  |
| --- |
| hl \* |

|  |
| --- |
| Фg |

|  |
| --- |
| Фn |

|  |
| --- |
| Rm |

|  |
| --- |
| Rd |

|  |
| --- |
| Rg |

|  |
| --- |
| ΔМ(tk+1) |

|  |
| --- |
| **М'i gen(tk+1)**  **М'i l(tk+1)**  **М'i r(tk+1)**  **М'i st(tk+1)**  **M'i об(tk+1)** |

|  |
| --- |
| Мj(tk+1) |

|  |
| --- |
| М(tk+1) |

|  |
| --- |
| М(tk) |

|  |
| --- |
| hr |

|  |
| --- |
| Khr |

|  |
| --- |
| M'н(tk) |

|  |
| --- |
| Kdj |

|  |
| --- |
| M'(tk+1) |

|  |
| --- |
| M'п(tk) |

|  |
| --- |
| M'(tk)\* |

|  |
| --- |
| Sl,st,gen |

|  |
| --- |
| Ks/м |

|  |
| --- |
| Kн/п |

|  |
| --- |
| Sк |

|  |
| --- |
| Ks/мr |

|  |
| --- |
| Srji |

|  |
| --- |
| Sl,st,geni |

|  |
| --- |
| Kji |

|  |
| --- |
| Граст \* |

|  |
| --- |
| Cp \* |

|  |
| --- |
| Kdji |

|  |
| --- |
| Распределение по компартментам |

**Фg={Jg⋅(rx+rc∑)[(Jg⋅(rx+rc∑))24⋅Jg⋅a⋅ rc∑]}/2⋅ rc∑**

**Jg** = 1/(1/αн⋅Qr+1/Фmax)

**a** = Ca+rc∑⋅Rd

**rc∑** = rc+rm

rc = 1,3/Dt+1,6⋅rst

где Фg брутто-фотосинтез; αн тангенс угла наклона световой кривой в точке компенсации; Qr интенсивность поглощенной ФАР; Фmax максимально возможный уровень фотосинтеза для растения; rx сопротивление карбоксилирования; rc∑ — устьично-кутикулярное сопротивление; rc  сопротивление диффузии СО2 в межклетник; rm сопротивление диффузии СО2 в мезофилле; Ca концентрация СО2 в атмосфере;

Для связи с расчетом прироста биомассы Фg надо перевести в нетто-фотосинтез (Фn):

**Фn = ФgRd.**

Итак, фотосинтез происходит в два этапа, называемые стадиями фотосинтеза: *световая* *стадия* и *темновой метаболизм*. Световая стадия идет в гранах хлоропласта и требует присутствия света красно-оранжевой и сине-фиолетовой части спектра. Скорость световой стадии зависит от интенсивности, спектрального состава света и концентрации хлорофилла в клетках фотосинтезирующих органов. В полевых условиях регулировать эти факторы весьма затруднительно, а, порою, совсем невозможно.

Темновая фаза проходит в строме хлоропласта, не требует присутствия света и происходит как в светлое время суток, так и некоторое время после захода Солнца. В этой фазе проходит синтез ассимилянтов, которые затем распределяются по всем органам растения. Скорость реакций в темновой фазе является одним из лимитирующих факторов фотосинтеза.

Следовательно, первым лимитирующим фактором фотосинтеза можно считать ***интенсивность и соотношение световой и темновой стадий фотосинтеза***. Второй фактор – ***плотность стеблестоя в посеве*** и связанное с ним ***расположение листьев в пространстве*** (архитектоника растительного покрова). В нижних, слабо освещенных ярусах, интенсивность фотосинтеза листьев снижается (особенно в загущенных посевах), а дыхания – остается на таком же уровне, как и у хорошо освещенных листьев. В результате растение сбрасывает нижние листья и таким образом регулирует баланс прихода и расхода ассимилянтов.

Третий лимитирующий фактор – ***температура***. Влияние ее объясняется тем, что в клетках растения происходят химические реакции, интенсивность которых зависит от температуры физиологического раствора, который, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды.

Четвертый лимитирующий фактор – ***концентрация углекислого газа в клетке.*** При недостатке СО2 снижается скорость реакций синтеза органического вещества. В полевых условиях этот фактор зависит от интенсивности дыхания микроорганизмов, макроорганизмов и скорости ветра, переносящего насыщенные углекислым газом воздушные массы к посеву и выводящего обедненный этим веществом воздух за пределы экосистемы. Антропогенное регулирование этого фактора обеспечивается в открытом грунте внесением органических удобрений, а в защищенном, кроме органических удобрений, дополнительной подпиткой СО2 из газовых баллонов или раскладкой кусков сухого льда.

Углекислый газ не поглощается корневой системой растений, поэтому прежде, чем он будет участвовать в фотосинтезе, СО2 из почвы должен поступить в приземный слой атмосферы, где и поглощается фотосинтезирующими органами.

Таким образом, содержание СО2 в атмосфере определяется количеством его в естественном составе воздуха, поступлением из почвы и в процессе антропогенной деятельности.

## ГАЗООБМЕН ЛИСТА И ПОСЕВА

Насыщенный СО2 воздух приземного слоя атмосферы поглощается растениями через устьица, как это показано на схеме (рисунок 63).

Из схемы следует, что на процесс газообмена лист-воздух влияет скорость ветра в посеве (U) и устьичное сопротивление (rst). Во внутреннюю полость листа (Ci) углекислый газ поступает не только из атмосферы (Ca), но и за счет дыхания растительных клеток (R). Часть этого углекислого газа поступает в межклетники (μ), другая часть (1-μ) – в клеточный раствор. На растворимость газа влияет температура листьев (Tl). Она же оказывает влияние и на скорость биохимических реакций (А). Фотохимический процесс зависит от поглощенной ФАР (Qф). Наконец, на схеме показано лимитирование, связанное с возможным дефицитом азота в листьях (Nl).

|  |
| --- |
| **Са** |

|  |
| --- |
| **U** |

|  |
| --- |
| **rst** |

|  |
| --- |
| **Ci** |

|  |
| --- |
| **Cw** |

|  |
| --- |
| **A** |

|  |
| --- |
| **R** |

|  |
| --- |
| **μ** |

|  |
| --- |
| **1-μ** |

|  |
| --- |
| **Tl** |

|  |
| --- |
| **Qф** |

|  |
| --- |
| **Nl** |

|  |
| --- |
| Рис. 63. Потоковая диаграмма газообмена листа. |

Интенсивность фотосинтеза возрастает с повышением температуры до 25–30°С. Выше оптимального уровня наблюдается температурный стресс. Диапазон температур, в котором достигается оптимум фотосинтеза, смещается при уменьшении снабжения углекислым газом и светом в сторону более низких значений, а сам оптимум становится более «размытым».

Углерод межклетников (Ci) поступает в клеточный раствор (Cw), где в цикле Кельвина он расходуется на синтез ассимилянтов (А). Поэтому в светлое время суток Ci<Ca и поток СО2 направлен внутрь листа. В темное время суток синтез ассимилянтов прекращается, но дыхание продолжается, что приводит к повышению концентрации СО2 в клеточном растворе и в межклетниках. В этом случае Ci>Ca и поток СО2 направлен в атмосферу. В результате суточный ход газообмена листа принимает вид синусоиды (рисунок 64).

При недостатке одного или нескольких факторов, регулирующих газообмен, ситуация Ci>Ca может наблюдаться и при достаточно высокой освещенности. Например, в условиях засухи концентрация влаги в межклетниках снижается, устьица закрываются. Это приводит к резкому уменьшению суммарной проводимости СО2 и к уменьшению скорости фотосинтеза. Закрытие устьиц и уменьшение транспирации приводит к повышению температуры листа, что также снижает интенсивность фотосинтетических процессов. В результате наступает полуденная депрессия фотосинтеза. Аналогичных образом действуют и другие регулирующие газообмен факторы.



Рис. 64. Суточный ход газообмена листа.

## ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И УПРАВЛЕНИЕ РОСТОМ РАСТЕНИЯ

Первый уровень продуктивности определяется лимитированием работы фотосинтетического аппарата растений. Основными влияющими на этот уровень продуктивности факторами являются интенсивность поступающей фотосинтетически активной радиации и температура воздуха. Если предположить, что все остальные факторы находятся в оптимуме, это и будут комфортные условия. Любое отклонение – это уже стрессовое воздействие.

Для модели первого уровня продуктивности общий прирост биомассы за один временной шаг представляет собой разность нетто-фотосинтеза и темнового дыхания и рассчитывается по формуле

**ΔМ = Фn Rd**

**Rd** = Rg+Rm

Rg = kgФn

Rm = k1Мl+k2Мr+k3Мst+k4Мgen

где **ΔМ** прирост биомассы растения за сутки, г С⋅1см–2 посева; **Фn**  чистый фотосинтез за сутки, г С⋅1см–2 посева; **Rd**  темновое дыхание за сутки, г С⋅1см–2 посева; Rg дыхание роста, г СО2⋅см2 посева; Rm дыхание поддержания структуры, г СО2⋅см2 посева; kg коэффициент пропорциональности дыхания роста фотосинтезу (зерновые kg=0,280, картофель kg=0,0255; k1=0,03; k2=0,010; k3=0,015; k4=0,01 (*Koulen H., van., 1975; Полевой А.Н., 1983*); Мl биомасса листьев; Мr биомасса корней; Мst биомасса стеблей; Мgen биомасса генеративных органов.

Следовательно, при возрастании Фn прирост биомассы линейно увеличивается.

Прибавив ΔМ к биомассе предыдущего шага модели (M(tk)), получим суммарную биомассу целого растения:

**M(tk+1) = M(tk)+ΔМ**

Для прогноза накопления биомассы необходимы входные параметры Фn и Rd, которые требуют довольно сложных расчетов и некоторых трудноопределимых параметров. Поэтому для мониторинга и прогноза в производственных условиях можно применить хотя и упрощенные, но достаточно эффективные аппроксимации динамики биомассы в зависимости от биологического времени.

Широкомасштабный мониторинг биомассы посевов сельскохозяйственных культур невозможен из-за трудоемкости методики определения биомассы корневой системы. Между тем, нашими наблюдениями установлено, что отношение надземной к подземной биомассе мало варьирует по годам. Тем не менее, это динамическая величина, существенно изменяющаяся в течение периода вегетации. В начале его масса подземной части растения превышает надземную, но постепенно зависимость становится обратной (рисунок 65).



Рис. 65. Динамика биомассы ячменя, 1995г.

Характерно, что у двудольных растений этот процесс идет более интенсивно, подчиняясь экспоненциальной зависимости, в отличие от однодольных, где рост отношения надземные : подземные органы аппроксимируется степенной зависимостью:

* Однодольные: Кн/п = aCpb
* Двудольные: Кн/п = aeCp⋅b

Где Кн/п – коэффициент превышения надземной биомассы над подземной; Cp – суммарная энтальпия воздуха от даты посева, кДж⋅кг–1; a,b – статистические коэффициенты.

Верификация рассчитанных по эмпирическим данным 1995г. функций на независимом материале в 1996 году показала хорошее совпадение теоретических и эмпирических данных: кукуруза – R2 = 0,9497; ячмень – R2 = 0,9877; яровая пшеница – R2 = 0,9997; горох – R2 = 0,6500. Следовательно, для вычисления общей биомассы растения при обследовании полей достаточно знать суммарную энтальпию воздуха от посева (или весеннего возобновления вегетации) до даты отбора образцов и абсолютно сухую надземную массу растений.

По общей массе надземных органов растения (Мн) и рассчитанному соотношению ее с подземной (Кн/п), вычисляется биомасса всего растения (М(tk)) по зависимости:

М'(tk) = M'н(tk) / Кн/п(tk)+M'н(tk)

При отсутствии входных параметров базовой модели фотосинтеза, прогноз динамики биомассы рассчитывается по функции:

M'(tk+1) = aCpb + KorrM

KorrM = M’(tk) – aCpb,

где M' – прогнозируемая биомасса, г. абс.сух.в-ва⋅растение-1; a,b – статистические коэффициенты; KorrM – корректирующий коэффициент.

Верификация модели на независимом материале 1996 года показала следующие совпадения теоретических и эмпирических данных: кукуруза – R2 = 0,9100; ячмень – R2 = 0,9600; овес – R2 = 0,8978; пшеница яровая – R2 = 0,9257; горох – R2 = 0,9884.

Рассчитанную общую биомассу растения следует распределить между органами растения, что позволит определить урожай основной, побочной продукции и корневых остатков, то есть связать модель продукционного процесса с моделями животноводства, экологии и экономики сельскохозяйственного предприятия.

Расчет ростовых функций фитоорганов целесообразно вести в относительных единицах, что позволит избежать значительного отклонения результатов от среднего по годам. Вычисление ростовых функций ведется по эмпирическим данным (рисунок 66).

В начале роста фитоорганов их биомасса возрастает, но по мере старения и созревания наблюдается тенденция к снижению фотосинтеза и возрастанию оттока ассимилянтов из фотосинтезирующих органов.

Следовательно, доля активных фитоорганов – это динамическая величина, зависящая от таксономического вида и возраста растения, определяющегося, в свою очередь, энтальпией среды:



|  |
| --- |
| Рис. 66. Распределение деятельной биомассы по фитоорганам ячменя (доли единицы), 1995г. |

Kdj = aLnCp+b,

где Kdj – доля j-го органа в абсолютно сухой биомассе растения, безразмерная; a,b – статистические коэффициенты.

Тогда функция динамики биомассы j-го органа (M'j(tk)) будет определяться, как

M'j(tk) = M'(tk)Kdj

M'об(tk) = M'(tk)–∑M'j(tk),

где M'об(tk) – суммарная биомасса отмерших органов на текущем шаге работы модели, г.абс.сух.в-ва⋅растение-1.

Период активного состояния фитоорганов определяется генетической продолжительностью вегетации, на которую накладывается действие внешних факторов влияющих на скорость прохождения фаз развития. Одним из таких факторов является сумма тепла, полученного растением. Поэтому в тропиках высокая температура сокращает период роста и урожай зерна, несмотря на высокие уровни солнечной радиации, а в более высоких широтах с низкой температурой и, следовательно, длительным периодом роста и высоким уровнем радиации урожай зерна был гораздо выше.

На сумму полученной растением тепловой радиации влияют сроки появления всходов. В свою очередь, время появления всходов может определяться глубиной заделки семян. С увеличением глубины посева уменьшается величина урожая, особенно это заметно для культур с массой 1000 семян порядка 24,34,56г. Следовательно, наблюдается преимущество мелкой заделки крупных семян для сокращения до минимума периода появления всходов.

Включение ростовой функции того или иного фитооргана определяется биологическим временем –суммарной энтальпией воздуха от даты посева (или возобновления вегетации).

Нормативами некоторых технологических операций являются обработка почвы на определенную глубину или срезание надземной фитомассы на определенной высоте, что может привести к погрешности работы модели. В частности, от высоты среза зависит сбор продукции с единицы площади, так как часть надземной биомассы остается в поле. Корневая система, как и надземная масса, распределяется по компартментам неравномерно. Поэтому если применять глубокое рыхление, то накопление органических остатков будет неравномерным по глубине гумусового горизонта, а если выполняется вспашка, учет неравномерности распределения биомассы поможет смоделировать ее перераспределение по пахотному горизонту.

Если учитывать долю каждого фитооргана в компартменте, являющуюся динамической величиной, то распределение биомассы органа записывается функцией:

M'ij(tk) = M'j(tk)Kdji

Kdji = aLnCp+b

где M'ij(tk) – биомасса j-го органа в i-м компартменте на текущем шаге работы модели, г.абс.сух.в-ва⋅растение-1; Kdji – доля j-го органа в i-м компартменте, безразмерная; a,b – статистические коэффициенты.

В результате становится возможным вычислить биомассу для любого компартмента в пределах диапазона работы функции Kdji.

Для связи с другими модулями модели продукционного процесса, модуль роста и развития растений должен обеспечивать расчет прогноза динамики индекса фитоорганов компартментов (Lij), высоты стеблей (hl), глубины корневой системы (hr) и количества стеблей на единице площади (Граст) (см. рисунок 62).

## ИНДЕКС ФИТООРГАНОВ КОМПАРТМЕНТА

Численные значения индексов фитоорганов поступают на вход модулей влагопереноса в почве, радиационного режима посева и тепло- и влагопереноса в почве. Расчет их ведется по общей формуле

**Lji** = SSlji Г 0,0001

где **Lji** – индекс j-го фитооргана в i-м компартменте; SSlji – площадь j-го органа в i-том компартменте для одного растения, см2; Г – количество растений на 1м2.

Из формулы следует, что основным параметром при расчете индексов является плотность популяции и площадь фитоорганов. Определить последнюю в полевых условиях достаточно затруднительно, что ограничивает применение стандартных методов при массовом мониторинге посевов. Кроме того, этот параметр динамический, зависящий от возраста растения, степени воздействия растительноядных организмов и агротехнических условий. Например, возрастание площади корней и листьев овса наблюдается до фазы трубкования, стеблей – от трубкования до выметывания, генеративных органов – от выметывания до твердой спелости. В дальнейшем фитоорганы отмирают и площадь их активной поверхности постепенно снижается (рисунок 67).

Результаты наших наблюдений позволили значительно упростить методику определения площади активной поверхности фитоорганов исходя из предположения наличия связи между биомассой растения и площадью его органов. Поскольку первая – динамический параметр, следовательно, ее изменение повлечет за собой изменение второй. Поэтому было вычислено отношение площади надземных органов к их биомассе (Ks/м) и корневой системе (Ks/мr). В результате получаем функцию

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| Рис. 67. Динамика площади ассимилирующих фитоорганов овса, 1995г. |

Sl,st,gen = M'н Ks/м

Sr = M'п Ks/мr

где Sl,st,gen – площадь надземных фитоорганов, см–2; Sr – площадь корневой системы, см–2; M'н – масса надземных фитоорганов, г⋅растение–1; M'п – масса корневой системы, г⋅растение–1.

Площадь надземных органов нецелесообразно разделять на листья, стебли и генеративные органы, так как все они участвуют в фотосинтезе.

Коэффициенты Ks/м и Ks/мr описываются системой динамических функций от суммарной энтальпии воздуха:

Ks/м, Ks/мr = ***f***(Cp)

Далее вычисляется площадь фитоорганов одного растения (или одного стебля) (SSl). Распределение их по компартментам рассчитывается по функциям

SSl = Sl,st,gen,r Kji

Kji = a lnCp+b,

где a,b – статистические коэффициенты; Kji – доля фитооргана в компартменте.

В результате, проведя учет надземной биомассы в полевых условиях, можно вычислить массу корневой системы, затем рассчитать площадь надземной и подземной частей растения, которая в дальнейшем распределяется по атмосферным и почвенным компартментам.

## ДИНАМИКА ВЫСОТЫ СТЕБЛЕЙ И ГЛУБИНЫ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ РАСТЕНИЙ

Входными параметрами модулей «режим влажности почвы» и «радиационный режим посева» являются высота посева и глубина корневой системы. Эти параметры изменяются во времени, следовательно, процесс следует описать динамическими функциями.

Для нормального роста растению необходимы вода и минеральное питание. Поэтому в гетеротрофный период первоначально растет корень, что объясняет преобладание длины корня над высотой стебля, причем, такая закономерность характерна не только для однолетних растений, но и для многолетних в период весеннего отрастания. После укоренения начинает расти стебель, высота которого очень быстро превосходит длину корней (рисунок 68).

Следует отметить, что интенсивность роста стебля выше у двудольных, чем у однодольных, поэтому динамика высоты растений этих классов описывается разными типами функций:

* Однодольные: hl = a lnCp+b
* Двудольные: hl = a Cpb

где hl – высота растений, см; Cp – суммарная энтальпия воздуха, кДж⋅кг–1; a,b – статистические коэффициенты.

В течение периода вегетации изменяется и глубина основной массы корневой системы. Однако, зависимость этого параметра от высоты растений не является линейной. В начальный период длина корней значительно превышает высоту надземных органов, но постепенно тенденция становится противоположной. Если вычислить отношение «глубина корневой системы : высота растения», то получается коэффициент, зависящий от биологического времени и с достаточно высокой точностью рассчитывающийся степенной функцией от суммарной энтальпии воздуха:

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| Рис. 68. Динамика линейных параметров яровой пшеницы, 1995г. |

Khr = a Cpb,

где Khr – коэффициент глубины корневой системы; a,b – статистические коэффициенты.

Применение этого коэффициента значительно упрощает мониторинг посевов, так как исключается необходимость трудоемкой операции по извлечению почвенного монолита и отделение корневой системы от почвы, поскольку длина корней рассчитывается как

hr = hl Khr

Структурная схема модуля роста и развития растения, предусматривающая работу в режимах «базовый» и «мониторинг» представлена на рисунке 62. В базовом режиме на вход подаются: концентрация углекислого газа в атмосфере (Са); максимально возможный уровень фотосинтеза для растения (Фmax); тангенс угла наклона световой кривой в точке компенсации (αн); интенсивность поглощенной ФАР (Qr) (подается с модуля радиационного режима посева); сопротивление карбоксилирования (rx); сопротивление диффузии СО2 в межклетнике (rm); сопротивление устьиц (rst); проводимость прилистного слоя воздуха для тепла (Dt) и коэффициент турбулентного обмена количества движения (ku), который подается с модуля тепло- и влагопереноса в посеве.

При работе в режиме мониторинга вводятся необходимые для прогноза исходные характеристики посева, полученные эмпирическим путем: плотность популяции растений (Граст); высота надземной массы растения (hl); абсолютно сухая масса надземной части растений (М’). Поскольку прогноз биометрии строится на основе суммарной энтальпии воздуха (Ср), значение этого параметра берется с выхода модуля тепло- и влагопереноса в посеве.

С выхода рассматриваемого модуля снимается биомасса фитоорганов, распределенная по компартментам атмосферы и почвы, которую в дальнейшем можно использовать как самостоятельный параметр или подавать на вход экономической модели управления сельскохозяйственным производством.

Для работы других модулей модели продукционного процесса с выхода данного модуля снимаются индекс фитоорганов (для модулей тепло- и влагопереноса в посеве, влагопереноса в почве, радиационного режима посева), сопротивление устьиц (для модуля тепло- и влагопереноса в посеве), высота растения (для модуля радиационного режима посева), глубина корневой системы (для модуля влагопереноса в почве).

## ДИНАМИКА КОЛИЧЕСТВА РАСТЕНИЙ НА ЕДИНИЦЕ ПЛОЩАДИ

По результатам обобщения экспериментального материала (*Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд К., 1989*) установлено, что самоизреживание популяций наблюдается с постоянной скоростью. Причем, чем ниже исходная плотность популяции, тем позднее начинают проявляться конкурентные взаимодействия (рисунок 69). Наблюдениями за популяциями различных таксономических видов растений обнаружено, что наклон линии изреживания является величиной постоянной. Поэтому чем выше начальная плотность, тем раньше начинается изреживание. Эту зависимость часто называют «**закон степени –3/2**» (*Yoda et al., 1963*):

**w’ = c⋅d–3/2,**

где w’ – средняя масса 1 растения; d – плотность, экз./м2; с – коэффициент, определяющий высоту заложения линии по оси (Y).

|  |
| --- |
| Линия изреживания |



|  |
| --- |
| Количество выживших особей |

|  |
| --- |
| Рис. 69. Динамика численности популяции при изреживании в соответствии с «законом степени –3/2» |

Управление параметрами продукционного процесса в рассматриваемом модуле осуществляется через регулирование плотности популяции (Граст), высоты (hl) и площади фотосинтезирующих органов (SSlj) растений.

Исходное количество растений на единице площади определяется, главным образом, нормой посева или посадки и операциями по формированию оптимальной плотности растений на единице площади. Площадь фотосинтезирующих органов зависит в первую очередь от таксономического вида культуры, сорта и уровня минерального питания. Регулирование высоты растений выполняется путем обработки посевов ретардантами и выбором сорта

Компьютерный вариант модуля работает в режиме мониторинга производственных посевов основных полевых культур. По запросу программы вводятся: масса абсолютно сухого вещества надземных фитоорганов (г⋅растение–1); плотность популяции культурного растения (стеблей⋅м–2 или растений⋅м–2); средняя высота стеблей (см); диапазон суммарной энтальпии и шаг расчета. С выхода модуля снимаются: фаза развития растения, плотность популяции культурного растения, суммарная энтальпия воздуха, масса абсолютно сухого вещества с 1м2 (в том числе масса листьев, стеблей, корней, генеративных органов, семян, подземной проводящей части стебля, отмершей биомассы), площадь и индекс надземных и подземных фитоорганов, распределение массы, индексов и площади фитоорганов по компартментам с интервалом и на период, задаваемые пользователем.

Корреляционный анализ между расчетными и эмпирическими значениями параметров биомассы растений показал высокую степень соответствия, что обеспечивает применение модуля в условиях производства для расчета прогноза роста и развития ежи сборной, льна долгунца, ярового рапса, ячменя, овса, яровой пшеницы, гороха и кукурузы (таблица 2).

**Контрольные вопросы**

1. Какое значение имеет фотосинтез в жизни растения?
2. Как происходит газообмен в листе и посеве?
3. Принципы и методика прогноза и мониторинга динамики биометрических параметров и управления ростом растения.

Таблица 2. Оценка верификации модуля роста и развития растений по коэффициенту корреляции (r).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Культура | Глубина корней | Масса абсолютно сухого вещества | | | | | | | |
| суммарная | листья | стебли | генеративные органы | семена | Подземная проводящая часть стебля | Отмершая | корни |
| Ежа сборная | 0,90 | 0,97 | 0,93 | 0,99 | 0,99 | \* | \*\* | 0,85 | 0,94 |
| Лен долгунец | 0,84 | 0,87 | 0,99 | 0,93 | 1,00 | \* | 0,66 | 0,99 | 0,90 |
| Рапс яровой | 0,95 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | \* | 0,99 | 0,86 | 0,92 |
| Ячмень | 0,70 | 0,99 | 0,98 | 0,91 | 1,00 | 1,00 | 0,68 | 0,66 | 0,97 |
| Овес | 0,61 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,96 | 0,99 | 0,78 | 0,83 | 0,90 |
| Яровая пшеница | 0,17 | 0,99 | 0,95 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,88 | 0,84 | 0,61 |
| Горох посевной | 0,90 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,48 | 0,99 | 0,96 |
| Кукуруза (на силос) | 0,40 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | \* | 0,38 | 0,97 | 0,86 |

Примечание: \* – входит в массу генеративных органов; \*\* – входит в массу корневой системы.