

3 ОСОБЕННОСТИ БАЗИСНЫХ МОДЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ НАЗЕМНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ И МОНИТОРИНГА

Базисную модель наземной экосистемы, в соответствии с исследованиями [3], целесообразно реализовывать через модели двух, функционально связанных блоков, - процессов, происходящих в почве, и продукционного процесса растений. В интегральной форме эти модели описывают четыре основных функциональных процесса - фотосинтеза, дыхания, роста и отмирания наземной растительности различных видов: лесной, травяной и сельскохозяйственной (культурной).

Проанализируем *составляющие продукционного процесса*. Фотосинтез зависит от интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР), водного и температурного режимов, концентрации углекислого газа в атмосфере, плодородия почвы и видовых особенностей растений. Дыхание, в отличие от фотосинтеза, осуществляется не только в листьях, но и во всех других частях растений - листьях, стеблях и корнях, при этом, затрагивается накопленное органическое вещество. Описание роста и отмирания растений в математических моделях представляет особую сложность, так как, во-первых, - растения обладают способностью накапливать ассимилянт в резерв, используемый в подходящих условиях, зависящих от микроклимата, во-вторых, - неизвестна адаптивная способность растений.

С учетом этого, в анализируемую модель необходимо включить следующие блоки: почвенный, ростовой, фотосинтетический и гидрометеорологический. При этом, *фотосинтетический блок* должен базироваться на расчете транспирации, фотосинтеза и дыхания, *ростовой* - на описании динамики роста отдельных органов растений, *гидрометеорологический* - на распределении интенсивности ФАР, концентрации углекислого газа, влажности воздуха, водного потенциала почвы и растений, температуры воздуха, *почвенный* - на плодородии почвы, как совокупности водно-воздушного, теплового и пищевого режимов.

Модель трансформации наземной экосистемы должна быть незамкнутой, где входными параметрами являются природно - климатические факторы окружающей Среды, определяющие наличие влаги и питательных веществ в почве.

Наиболее простое описание процесса трансформации наземной экосистемы заключено в модели Литта - Рябчикова [19]

$$R_p = \frac{W \cdot n}{36 \cdot R} \cdot \left\{ \min(1 + \exp(1,3 - 0,2 \cdot T))^{-1} \cdot (1 - \exp(-0,001 \cdot r)) \right\}, \quad (3.1)$$

где W - эффективное валовое увлажнение, мм/год; n - продолжительность сезона вегетации, декад; R - годовой термический баланс; T - среднегодовая температура воздуха; r - среднегодовое количество осадков. Более полной и динамичной является модифицированная модель Афанасика - Закржевского, имеющая вид

$$M_{\tau} = K_a \cdot E_n \cdot X_{\tau} \cdot C_b \cdot \beta_{\Phi} [1 - \sigma(t_p)] \cdot \left[1 - \left(\frac{\varphi_{оп}^i - \varphi^i}{\varphi_{оп}^i - \varphi_{кр}^i} \right)_{max}^{b_i} \right], \quad (3.2)$$

в которой M_{τ} - потенциально возможный прирост органической массы при оптимальных условиях факторов внешней Среды; K_a - интенсивность фотосинтеза при световом насыщении и нормальной концентрации CO_2 ; E_n - интенсивность ФАР; X_{τ} - коэффициент полезного действия поглощенной радиации, изменяющийся во времени в связи с возрастным изменением клеточного и межклеточного обмена; C_b - концентрация CO_2 на хлоропластах листа; β_{Φ} - трансформационный коэффициент массы первичных ассимилятов в новое органическое вещество; $\sigma(t_p)$ - долевого коэффициент продуцируемых ассимилятов фотосинтеза, характеризующий их расход в процессе дыхания, роста; $\varphi_{оп}^i$, φ^i и $\varphi_{кр}^i$ - оптимальное, текущее и критическое значение лимитирующего фактора; b_i - наклон световой кривой фотосинтеза на расчетном интервале времени.

При этом, в качестве граничных условий, используется лимитирующее уравнение по элементам питания

$$M_{\tau}^{Pi} = \beta_{\Pi}^i \cdot \Pi_{\tau}^i, \quad (3.3)$$

где β_{Π}^i - масса вновь образованного органического вещества на единицу лимитирующего элемента питания; Π_{τ}^i - градиент эффективной концентрации элементов в почве у корней. Критерии обеспеченности фотосинтеза элементами питания (свето-пищевого соответствия Φ_{Π}) и пищевой обеспеченности фотосинтеза (пищевого соответствия Π_{Φ}) определяются как:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{K_a \cdot \Phi_a \cdot X_{\tau} \cdot C_b \cdot \beta_{\Phi} [1 - \sigma(t_p)] \cdot \left[1 - \left(\frac{\varphi_{оп}^i - \varphi^i}{\varphi_{оп}^i - \varphi_{кр}^i} \right)_{max}^{b_i} \right]}{\frac{\beta_{\Pi}^i}{\beta_{\Phi}^i} \cdot E_{\tau}^i \cdot K_{\tau}^i \cdot \frac{S_i \cdot \gamma_0}{W_{\tau}}} \leq 1; \quad (3.4)$$

$$\Pi_{\Phi} = \frac{1}{\Phi_{\Pi}} \geq 1,$$

где S_i - содержание подвижных форм i -го элемента на сухую навеску; γ_0 - содержание сухого вещества в единице объема; W_{τ} - объемная влажность почвы.

Изменение плотности биомассы растительности (P) может быть аппроксимировано следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{dP}{dt} = \min\{\rho_P, P, R_{PP}\} - M_P - T_P, \quad (3.5)$$

где ρ_p - максимальный продукционно-биологический коэффициент (ПБК) рассматриваемого типа наземной растительности; R_{pp} - продуктивность растительности - при меньших текущих значениях ПБК; M_p и T_p - величины отмирания и затрат на дыхание в единицу времени, соответственно.

Продуктивность растительности R_{pp} может быть описана зависимостью -

$$R_{pp} = k_{pc} \cdot k_{po} \cdot H_{pe} \cdot H_{pc} \cdot H_{pz} \cdot H_{pw} \cdot H_{pt} \cdot \exp\left(-\frac{b_p}{\rho}\right), \quad (3.6)$$

мультипликативно отражающей роль основных факторов окружающей Среды, где H_{pe} , H_{pc} , H_{pz} , H_{pw} и H_{pt} - функции воздействия на динамику роста растительности солнечной радиации, концентрации CO_2 , загрязненности Среды, влажности почвы и температуры, а k_{pc} , b_p и k_{po} - коэффициенты зависимостей продукционного процесса от биомассы растительности.

Функции воздействия можно выразить системой следующих расчетных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} H_{pc} &= \left(\frac{a_1}{E_n} + \frac{a_2}{C_1} \right)^{-1}; \\ H_{pt} &= P_0 \cdot \exp\left[-\alpha_{pt}(T - T_{\max})^2\right]; \\ H_{pz} &= \exp(-d \cdot \xi \cdot Z); \\ H_{pw} &= 1 - \exp\left[-k_{pw}(W_s + W_{sq})\right]; \\ H_{pe} &= \frac{E_n}{E_p} \cdot \exp\left[-\frac{E_n}{E_p}\right], \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где E_n - интенсивность ФАР; E_p - оптимальная освещенность; ξ , α_{pt} , a_1 и a_2 - экспериментальные коэффициенты; C_1 - концентрация углекислого газа в атмосфере; T - расчетная температура воздуха; $T_{\max}$ - температура, определяющая максимальную интенсивность фотосинтеза; k_{pw} - коэффициент удельной транспирации; W_s - скорость транспирации для растительности; W_{sq} - максимальная испаряемость в регионе; d - скорость загрязнения атмосферы в результате процессов выветривания, эрозии и др.; Z - концентрация химических элементов в почве; P_0 - интенсивность фотосинтеза при $T_{\max}$.

Определимся с основными функциями воздействия на динамику роста растительности.

1. Функция влажности почвы H_{pw} формируется в период транспирации растений (W_s).

Скорость транспирационных процессов можно описать уравнением

$$W_S = k_{iAP} \cdot W_{SiP}, \quad (3.8)$$

где $W_{SiP} = k_{iSX} \cdot R_{Xi} + k_{iSY} \cdot R_{Yi} + k_{iSL} \cdot R_{Lii}$; k_{iAP} - коэффициент транспирации; k_{isp} - количество воды (водопотребление), расходуемое на образование единицы биомассы растительности типа $P(X,Y,L)$. Величины R_{Pi} можно аппроксимировать уравнением

$$R_{Pi} = \varepsilon_i \cdot r_{Pi}, \quad (3.9)$$

в котором ε_i - доля солнечной энергии, усвояемая при фотосинтезе, или $\varepsilon_i = \varepsilon_{i0} \cdot [1 - \exp(-\varepsilon_{i1} \cdot W_{iS})]$, где ε_{i0} - значение ε_i при достаточном количестве воды; ε_{i1} - коэффициент, отражающий падение усвояемости энергии солнечной радиации растениями при уменьшении количества доступной влаги.

Скорость физического испарения воды в регионе легко описывается модифицированным уравнением Ольдекопа

$$W_{SQ} = r_i \cdot \left[1 - \exp \left[- \frac{E_i \cdot W_{iA}}{\ell_i \cdot E_i(t_0)} \cdot \left(\frac{T_i}{T_i(t_0)} \right)^{0.5} \right] \right], \quad (3.10)$$

в котором r_i - годовое количество осадков; E_i - среднемноголетнее суммарное испарение с суши; W_{iA} - испаряемость в i -ом регионе при оптимальном количестве осадков; $E_i(t_0)$ - суммарное испарение с суши в расчетном году; ℓ_i - линейный размер i -ого региона или

$\ell_i = 2 \sqrt{\frac{\sigma_i}{\pi}}$, где σ_i - площадь расчетного региона; T_i и $T_i(t_0)$ - соответственно, среднемноголетняя и среднегодовая температура реального года.

II. Функция воздействия солнечной радиации зависит от интенсивности ФАР (E_P) и оптимальной освещенности (E_P); она достаточно полно изучена Афанасиком Г.И. и Закржевским П.И.

III. Функция воздействия загрязненности Среды описана в предыдущем разделе.

IV. Функция воздействия температуры определяется лимитирующей взаимосвязью температурного и водного режимов с проецированием температурного фактора через температуру растения.

При этом, максимальная биопродуктивность достигается при оптимальной температуре растительного покрова, ибо как увеличение, так и уменьшение температуры обуславливают снижение фотосинтеза и, соответственно, биопродуктивности.

В целом, температура растительного покрова зависит от уровня транспирации, находящейся в тесной связи с радиационным балансом испаряющей поверхности, т.е.

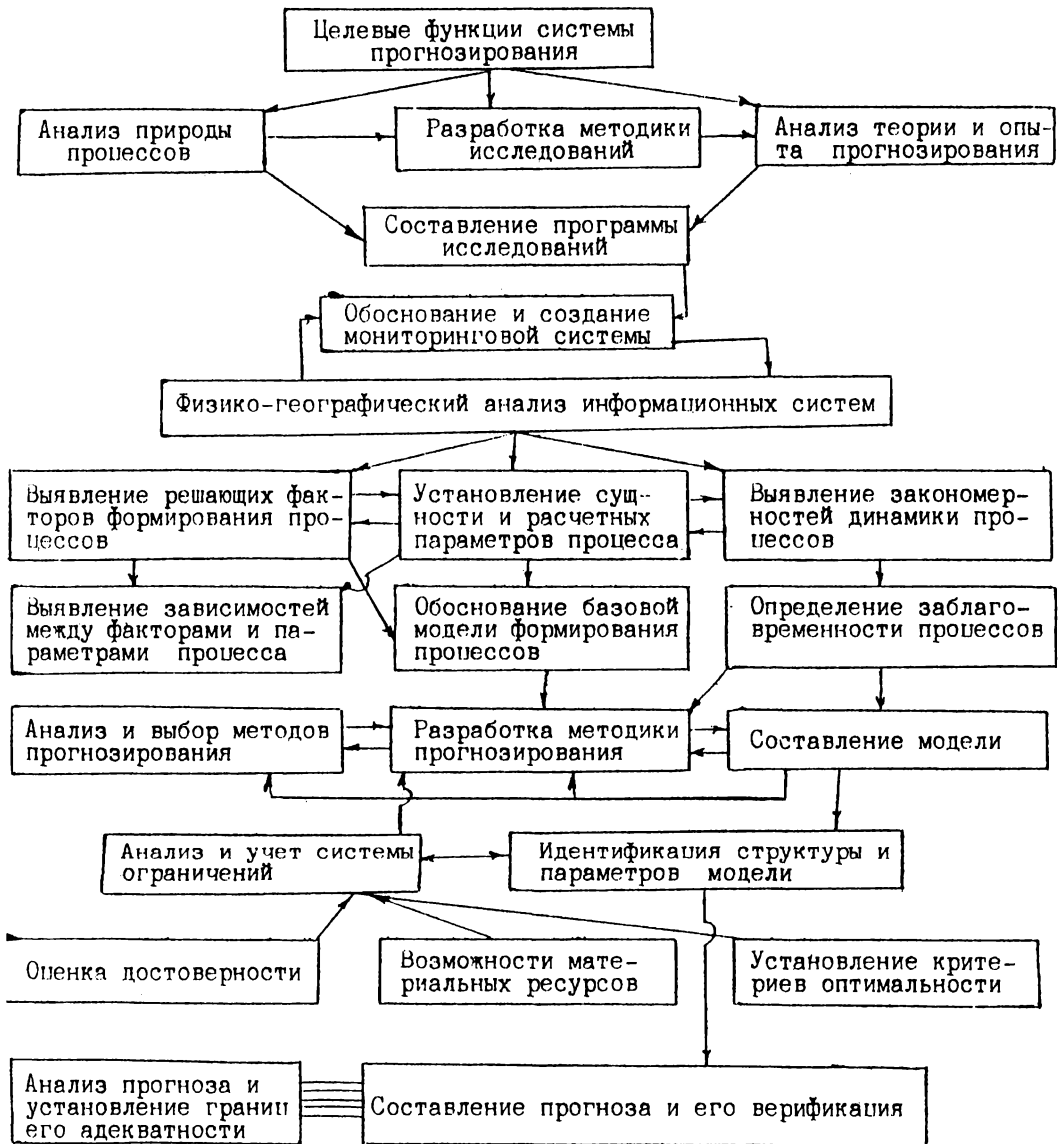


Рис. 3.1 Принципиальная схема системы прогнозирования изменений природной среды.

$$t_p^i = \frac{R_B}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{Q}{R_B} - \frac{E_T \cdot r}{R_B} \right) + t_b^i, \quad (3.11)$$

где R_B - величина радиационного баланса; Q - поток тепла в почву; α - коэффициент теплообмена в системе - растение - воздух; E_T - транспирация; t_b^i - показатель температурного режима региона в вегетационный период; r - влажность воздуха.

На рис 3.1 представлена обобщенная принципиальная схема системы прогнозирования изменений природной Среды, в которой мониторинговая модель входит составной частью.

В целом потенциальный объем фотосинтеза, реализуемый через функцию воздействия температур, можно определить по формуле

$$P_0 = E_T \cdot [1 - \sigma(t_p)] \cdot \left[1 - \left(\frac{t_{OP}^{Pi} - t_P^{Pi}}{t_{OP}^{Pi} - t_{KP}^{Pi}} \right)^2 \right], \quad (3.12)$$

где t_{OP}^{Pi} , t_P^{Pi} , и t_{KP}^{Pi} - соответственно, оптимальное, текущее и критическое значение температуры растительного покрова; $\sigma(t_p)$ - доля продуцируемых ассимилятов фотосинтеза, расходуемых в процессе дыхания, роста.

V. Функция воздействия концентрации углекислого газа (CO_2) определяется, исходя из предпосылок, что интенсивность фотосинтеза можно оценить только в связи с концентрацией CO_2 в атмосфере, считая, что освещенность постоянна и тогда

$$H_{PC} = \alpha_P \cdot C_1 \cdot (C_P + C_1), \quad (3.13)$$

где C_P - концентрация CO_2 в атмосфере, при которой достигается значение функции $H_{PC} = \alpha_P/2$, или же учитывая факт, что повышение освещенности обеспечивает интенсификацию фотосинтеза при постоянной концентрации углекислого газа в атмосфере. Характерная сегодня концентрация углекислого газа в атмосфере определяет линейную зависимость интенсивности фотосинтеза от изменения содержания CO_2 .

В заключение отметим, что современная теория прогнозирования - предполагает непрерывный анализ причинно-следственных связей предсказуемых природных процессов. Большинство исследователей, занимающихся разработкой прогнозных схем изменения природных условий, считают наиболее целесообразным представлять их в виде подсистем - теоретического и информационного обеспечения, выбора концептуальных прогнозных методик, синтеза, и анализа их достоверности.