

УДК 574.36

UDC 574.36

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ И НАКОПЛЕНИЯ БИОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ НА ПРИМЕРЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ**MATHEMATICAL MODEL OF THE DEVELOPMENT AND ACCUMULATION OF TREE BIOMASS**

Медяков Андрей Андреевич
к.т.н.

Medyakov Andrey Andreevich
Cand.Tech.Sci.

Онучин Евгений Михайлович
к.т.н., доцент

Onychin Evgeny Mihailovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor

Перетягин Павел Андреевич
студент
Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

Peretyagin Pavel Andreevich
student
Volga State University of Technology, Ioshkar-Ola, Russia

В статье приведено описание модели нестационарного роста биологических объектов на примере Сосны обыкновенной. Рассмотрены особенности моделирования роста биологических объектов

The article describes the model of the unsteady growth of biological objects on the example of pine. The features of the growth modeling of biological objects are presented

Ключевые слова: БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ, АССИМИЛЯЦИОННЫЙ АППАРАТ, ЗОНА ПИТАНИЯ, СОСНА ОБЫКНОВЕННАЯ

Keywords: BIOLOGICAL OBJECTS, ASSIMILATION APPARATUS, FEED ZONE, PINE

Введение

Математическое моделирование все глубже проникает не только в технику, но и во все сферы человеческой деятельности. Под математическим моделированием в технике понимают адекватную замену исследуемого технического устройства или процесса соответствующей математической моделью и ее последующее изучение методами вычислительной математики с привлечением средств вычислительной техники.[1]

В настоящее время значительный интерес для исследователей представляет моделирование различных биологических процессов, осуществляемое с целью управления ростом и развитием биологических объектов. В области лесного хозяйства разработка математических моделей ведется в рамках популяций или экосистем деревьев, в рамках которых отдельно дерево является элементарным объектом (неделимым, но обладающим набором свойств) [2],[3] и в рамках отдельно стоящих

деревьев или их малых групп, в рамках которых рассматривается развитие элементов отдельного дерева[4],[5],[6],[7].

При моделировании нестационарных процессов роста биологических объектов необходимо учитывать особенности образования и накопления биомассы, стимулирующие и ограничивающие эти процессы факторы, влияние на эти процессы совокупности внешних факторов, значительно изменяющихся в течение года. Для этого важным является выбор адекватного и оптимального принципа моделирования.

Принципы моделирования

Для моделирования был выбран метод, представленный на рисунке 1, который представляет собой изменённый метод конечных разностей. Сначала осуществляется ввод входных величин, которые представляют собой параметры объекта моделирования и внешние параметры моделирования (или совокупность внешних условий, присущих району, типу леса и т.д. на разных этапах моделирования). Важным моментом является подстановка параметров в расчетную часть, в рамках которой определяется характер влияния (функциональный, случайный) и условия изменения параметров с течением времени.

При расчетах в рамках шага моделирования принимается, что условия являются постоянными, и расчет ведется по формулам для стационарных процессов формирования биомассы по средствам фотосинтеза. Шаг моделирования выбирается с учетом соблюдения постоянства условий в течение него.

Затем осуществляются запись значений для шага моделирования в таблицу результатов. Производится изменение параметров объекта с учетом протекания процессов в течение шага моделирования и внешних условий в зависимости от их циклических колебаний.

Измененные в течение шага входные параметры подставляются в расчетную часть на следующем шаге моделирования.

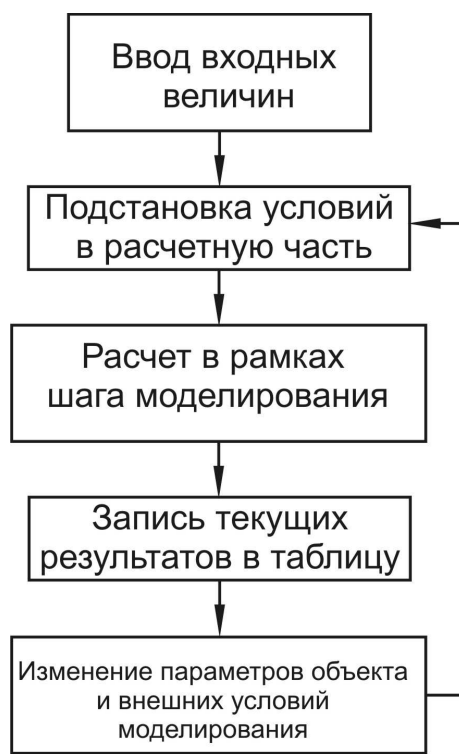


Рисунок 1 - Общий принцип моделирования динамических процессов роста

Рассмотрим основные этапы моделирования применительно к модели роста дерева, реализованной в среде Microsoft Office Excel, более подробно.

Описание модели

Ввод входных величин

В начале моделирования вводятся следующие входные величины:

- 1) период моделирования в годах – продолжительность последовательного изменения состояния объекта;
- 2) начальные параметры саженца – количество живой и неживой биомассы в кг, расположенной в хвое, сучьях, стволе и корнях саженца;

3) постоянные в рамках моделирования параметры почвы – среднее содержание в ней основных элементов в усвояемой форме (азота, калия, фосфора и серы);

	A	B	C	D
1				
2	Период моделирования, г.	100	36500	
3	Текущее состояния моделирования, г.	0	0	
4				
5	Изначальные параметры саженцев	Массы	живая	общая
6		хвоя, кг	0,002	0,002
7		сучья, кг	0,002	0,002
8		ствол, кг	0,004	0,004
9		корни, кг	0,002	0,002
10	содержание Азота на м3 почвы, кг	0,1		
11	содержание Калия на м3 почвы, кг	0,1		
12	содержание Фосфора на м3 почвы, кг	0,1		
13	содержание Серы на м3 почвы, кг	0,01		
14				
15				
16				

Рисунок 2 – Форма для введения начальных параметров саженца и постоянных в рамках моделирования величин

1	День п/п	Температура, оС	Стандартное отклонение (сигма)	инсоляция ср.дневная, Вт/м2	Стандартное отклонение (сигма)	продолжительность дня, ч	Влажность воздуха, % от макс абсолютной	Стандартное отклонение (сигма)	Влажность почвы,%	Стандартное отклонение (сигма)
2	1	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
3	2	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
4	3	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
5	4	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
6	5	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
7	6	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
8	7	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
9	8	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
10	9	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
11	10	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
12	11	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
13	12	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
14	13	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
15	14	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
16	15	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
17	16	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
18	17	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01
19	18	-13,9	0,1	100	0,1	10	0		10	0,01

Рисунок 3 – Таблица для циклически изменяющихся в процессе моделирования внешних факторов

4) циклически изменяющиеся в процессе моделирования внешние факторы – типичные для климатической зоны и географической широты изменения в течение года температуры, дневной инсоляции, продолжительности дня, влажности воздуха и почвы. Таблица параметров

составляется для каждого дня года с учетом случайного характера величин (кроме продолжительности дня).

Подстановка условий в расчетную часть

Затем осуществляется подстановка входных величин в зависимости от их характера и условий изменения в течение моделирования.

Значение периода моделирования непосредственно используется в рамках разработанной в среде Visual Basic for Application программы в качестве величины, характеризующей количество циклических изменений состояния объекта.

Начальные параметры саженца подставляются в расчетную схему в качестве текущих значений, характеризующих состояние объекта в начале цикла моделирования, с помощью следующего программного кода:

```
For j = 1 To 4
```

```
    Sheets("Рабочий лист").Cells(2 + j, 7).Value = Sheets("Рабочий  
лист").Cells(2 + j, 3).Value 'присваиваем текущему значению начальные  
условия живой биомассы'
```

```
    Sheets("Рабочий лист").Cells(2 + j, 8).Value = Sheets("Рабочий  
лист").Cells(2 + j, 4).Value 'присваиваем текущему значению начальные  
условия общей биомассы'
```

```
Next j
```

В расчетной схеме используются прямые ссылки на постоянные в рамках моделирования параметры почвы.

Значения циклически изменяющихся в процессе моделирования внешних факторов подставляются в расчетную схему согласно составленной таблицы в соответствии с текущим значением счетчика циклов моделирования. Один цикл моделирования соответствует одному дню роста, то есть значения изменяющихся внешних факторов повторяются через 365 циклов. Большинство изменяющихся внешних факторов являются случайными величинами, которые распределяются

относительно средних значений с некоторым отклонением. Для учета случайного характера воздействия величин используется функция возвращения обратного нормального распределения для расчета текущих значений случайных величин, используемых для расчетов в рамках цикла моделирования.

Расчет в рамках шага моделирования

При проведении расчетов в рамках шага (цикла) моделирования определяются параметры, характеризующие изменение состояние объекта в течение шага.

В рамках ассимиляции рассматриваются процессы получения энергии деревом и расходования энергии на дыхание. Для этого по формуле (1) определяется площадь кроны дерева ($S_{кон}$):

$$S_{кон} = \pi * a * \sqrt{a^2 + 1} * \left(\frac{3 * m_{хвои} / \rho_{хвои}}{\pi * a^2 * \left(1 - \left(1 - \frac{n}{100} \right)^3 \right)} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

где a - Отношение радиуса к высоте кроны, м/м; $m_{хвои}$ - текущая масса хвои, кг;

$\rho_{хвои}$ - плотность конуса хвои (конус без малого конуса), кг/м³; n - уменьшение линейных размеров малого конуса в %.

С учетом коэффициента эффективности хвои (с учетом проникания света вглубь кроны), м²/м² ($k_{проник}$) и коэффициента рабочей зоны хвои, м²/м² ($k_{раб.зоны}$) определяется эффективная площадь кроны ($S_{кон}^{эф}$) по формуле:

$$S_{кон}^{эф} = S_{кон} * k_{проник} * k_{раб.зоны} . \quad (2)$$

По формуле (3) определяется получаемая деревом солнечная энергия ($U_{получ.}$):

$$U_{\text{получ.}} = S_{\text{кон}}^{\text{эф}} * I_{\text{insol}} * T_{\text{дня}} * 3,6 * k_{\text{исп.}}, \quad (3)$$

где I_{insol} - инсоляция средневная, Вт/м²; $T_{\text{дня}}$ - продолжительность дня, ч; $k_{\text{исп.}}$ - коэффициент использования света, %.

При этом при понижении температуры окружающего воздуха ($T_{\text{окр.ср.}}$) ниже температуры начала жизнедеятельности ($T_{\text{жизн.}}$) значение получаемой деревом солнечной энергии принимается равным 0.

По формуле (4) определяется энергия, необходимая дереву на дыхание ($U_{\text{дых.}}$):

$$U_{\text{дых.}} = k_{\text{тем.}} \left(\frac{T_{\text{окр.ср.}} - T_{\text{жизн.}}}{10} \right) * (k_{\text{масса}} * m_{\text{дерева}} + k_{\text{вл.возд.}} * W_{\text{возд.}}), \quad (4)$$

где $k_{\text{тем.}}$ - коэффициент влияния температуры на дыхание (кратность увеличения при изменении T на 10 °С); $k_{\text{масса}}$ - коэффициент влияния массы дерева на дыхание, кДж/кг; $m_{\text{дерева}}$ - текущая масса дерева, кг; $k_{\text{вл.возд.}}$ - коэффициент влияния вл. воздуха на дыхание, кДж/%; $W_{\text{возд.}}$ - влажность воздуха, % от макс абсолютной.

Таким образом, разность между получаемой энергией ($U_{\text{получ.}}$) и затрачиваемой на дыхание ($U_{\text{дых.}}$) представляет собой энергию, доступную для синтеза биомассы ($U_{\text{синтез}}$):

$$U_{\text{синтез}} = U_{\text{получ.}} - U_{\text{дых.}}. \quad (5)$$

Энергия, затрачиваемая деревом на дыхание ($U_{\text{дых.}}$) определяет количество усваиваемого кислорода (N_{O_2}):

$$N_{O_2} = \frac{U_{\text{дых.}}}{k_{\text{дых.}}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{дых.}}$ - энергия, затрачиваемая при дыхании на кг кислорода, кДж/кг.

В рамках процесса ассимиляции синтез биомассы ($M_{орган.}$) лимитируется доступной энергией ($U_{синтез}$) и количеством усваиваемого кислорода (N_{O_2}) в соответствии с зависимостями:

$$M_{орган.} = U_{синтез} / k_U ,$$

$$M_{орган.} = N_{O_2} / k_{O_2} , \tag{7}$$

где $M_{орган.}$ - масса образующихся органических соединений, кг; k_U - энергия, необходимая на 1 моль органических соединений, кДж/моль; k_{O_2} - кислород, необходимый на 1 моль органических соединений, кг/моль.

Модуль расчета процесса ассимиляции представлен на рисунке 4.

Зависимые параметры	
площадь кроны, м2	79,83914485
Эффективная хвоя с учетом проникновения в крону и затенения, м2	47,90348691
Получаемая энергия, кДж	0
Энергия, необходимая на дыхание, кДж	17733,8599
Кислород, получаемый при дыхании, кг	17733859,9
моль CH2O по кислороду	554183121,8
Энергия, доступная для синтеза биомассы, кДж	0
моль CH2O по энергии	0

Рисунок 4 - Модуль расчета параметров процесса ассимиляции

При описании процесса корневого питания растения рассматриваются процессы усвоения воды и основных минеральных веществ из почвы.

Для этого по формуле (8) определяется объем питательного кома почвы ($V_{кома}$):

$$V_{кома} = m_{корней} * v_{корней} , \tag{8}$$

где $m_{корней}$ - текущая масса корней, кг; $v_{корней}$ - удельный объем, занимаемый корнями в почве, м³/кг.

Так же определяется площадь кома (конуса), занимаемого корнями, ($S_{\text{кон.кор.}}$) по формуле:

$$S_{\text{кон.кор.}} = \pi * b * \sqrt{b^2 + 1} * \left(\frac{3 * V_{\text{кома}}}{\pi * b^2} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (9)$$

где b - отношение радиуса питания к глубине корней, м/м.

По формуле (10) определяются количества доступных в почве воды и минеральных веществ ($N_{\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{почва}}$):

$$N_{\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{почва}} = V_{\text{кома}} * c_{\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}, \quad (10)$$

где $c_{\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}$ - содержание в почве воды и минеральных веществ, кг/м³.

А по формуле (11) определяются максимальные коэффициенты усвоения воды и минеральных веществ из почвы ($k_{\text{усв.}\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{макс.}}$):

$$k_{\text{усв.}\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{макс.}} = \frac{N_{\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{почва}}}{S_{\text{кон.кор.}}}. \quad (11)$$

При расчете количества доступных для питания воды и веществ ($N_{\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{дост}}$) производится сравнение коэффициентов усвоения воды и минеральных веществ, полученных по содержанию веществ в почве ($k_{\text{усв.}\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{макс.}}$), и известных значений коэффициентов для дерева ($k_{\text{усв.}\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}$). При недостаточном содержании веществ в почве расчет проводится по формуле:

$$N_{\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{дост}} = S_{\text{кон.кор.}} * k_{\text{усв.}\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{макс.}} * k_{\text{усв.}\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{влажность}}, \quad (12)$$

где $k_{\text{усв.}\text{H}_2\text{O},\text{N},\text{P},\text{K},\text{S}}^{\text{влажность}}$ - коэффициент усвоения воды и минеральных веществ из почвы, зависящий от влажности.

При достаточном содержании веществ в почве расчет проводится по формуле:

$$N_{H_2O,N,P,K,S}^{дост} = S_{кон.кор.} * k_{усв.H_2O,N,P,K,S} * k_{усв.H_2O,N,P,K,S}^{влажность} \quad (13)$$

В рамках процесса корневого питания синтез биомассы $M_{орган.}$ лимитируется количеством доступных для питания воды и минеральных веществ ($N_{H_2O,N,P,K,S}^{дост}$) в соответствии с зависимостью:

$$M_{орган.} = N_{H_2O,N,P,K,S}^{дост} * k_{H_2O,N,P,K,S} \quad (14)$$

где $k_{H_2O,N,P,K,S}$ - вода и питательные вещества, необходимые на 1 моль органических соединений, кг/моль.

Модуль расчета процесса корневого питания представлен на рисунке 5.

В рамках ограничения процесса синтеза биомассы в соответствии с зависимостями (7), (14) определяется лимитирующий фактор, по которому в дальнейшем рассчитывается получаемое количество органических соединений ($M_{орган.}$) и биомассы ($M_{биом.}$) (Рис.6):

$$\begin{aligned} M_{орган.} &= N_{лимит} * k_{лимит}; \\ M_{биом.} &= M_{орган.} * k_{орган.} \end{aligned} \quad (15)$$

где $N_{лимит}$ - количество лимитирующего фактора; $k_{лимит}$ - количество лимитирующего фактора, необходимое для синтеза 1 моля органических соединений, 1/моль; $k_{орган.}$ - количество молей органических соединений, необходимое для синтеза 1 кг биомассы, кг/моль.

Объем питательного кома почвы по живым корням, м3	4,793675607
Площадь конуса корней, м2	12,24874386
Азот, доступный в почве, кг	0,479367561
максимальный коэффициент усвоения Азота из почвы на S конуса корней, кг/м2	0,039136059
Азот, доступный для питания, кг	22,4196016
моль CH2O по азоту	11209,8008
Калий, доступный в почве, кг	0,479367561
максимальный коэффициент усвоения Калия из почвы на S конуса корней, кг/м2	0,039136059
Калий, доступный для питания, кг	22,4196016
моль CH2O по калию	11209,8008
Фосфор, доступный для питания, кг	0,479367561
максимальный коэффициент усвоения фосфора из почвы на S конуса корней, кг/м2	0,039136059
Фосфор, доступный для питания, кг	22,4196016
моль CH2O по фосфору	11209,8008
Сера, доступная для питания, кг	0,047936756
максимальный коэффициент усвоения Серы из почвы на S конуса корней, кг/м2	0,003913606
Сера, доступный для питания, кг	22,4196016
моль CH2O по кислороду	112098,008
Вода, доступная для питания, кг	479,2098726
максимальный коэффициент усвоения Воды из почвы на S конуса корней, кг/м2	39,12318505
Вода, доступная для питания, кг	22,4196016
моль CH2O по H2O	1245,533422

Рисунок 5 - Модуль расчета параметров процесса корневого питания

Распределение биомассы между элементами дерева (хвоя, сучья, ствол, корни) осуществляется в соответствии с выбранным распределением для шага моделирования (Рис. 6).

Условие ограничения реакции(1-О2, 2-эн., 3 - ... , 4-Азот, 5-Калий, 6-фосфор, 7-микро, 8-вода)	2
количество глюкозы на шаг, кг	0
3 Количество биомассы на шаг, кг	0
4 <i>Распределение для следующего шага</i>	
7 Хвоя	1
1 сучья	0
ствол	0
корни	0

Рисунок 6 – Расчет количества биомассы и ее распределения между элементами дерева

При этом предполагается наличие четырех возможных видов распределения биомассы, при которых вся биомасса расходуется на рост

одного элемента дерева (Рис. 7). Выбор сценария роста осуществляется на основе анализа лимитирующих факторов и механических свойств элементов дерева.

Возможное распределения биомассы	
<i>Корней не хватает</i>	
Хвоя	0
сучья	0
ствол	0
корни	1
<i>Хвои не хватает</i>	
Хвоя	1
сучья	0
ствол	0
корни	0
<i>Сучьев не хватает</i>	
Хвоя	0
сучья	1
ствол	0
корни	0
<i>Ствола не хватает</i>	
Хвоя	0
сучья	0
ствол	1
корни	0

Рисунок 7 - Рассматриваемые виды распределения биомассы

На основе анализа лимитирующих факторов определяется процесс (ассимиляционный или корневого питания), который ограничивает развитие дерева. Если развитие ограничивается процессом корневого питания, то для текущего шага моделирования принимается первый вид распределения, при котором вся биомасса идет на развитие корневой системы дерева.

Если развитие ограничивается процессом ассимиляции, то принимается второй вид распределения биомассы и идет развитие хвои (фотосинтезирующей части дерева). При этом учитываются механические особенности дерева, которые заключаются в том, что сучья могут нести на себе только определенное количество хвои, а ствол дерева может удерживать только определенное количество сучьев (Рис.8.). Эти условия учитываются путем сравнения текущих отношений масс элементов дерева с

максимально возможными для данного вида. При повышении отношения массы хвои к массе сучьев выше максимального значения принимается третий вид распределения биомассы, при котором происходит развитие сучьев дерева. При повышении отношения массы сучьев к массе ствола выше максимального значения принимается четвертый вид распределения биомассы, при котором происходит развитие ствола дерева.

максимальное отношение сучьев к стволу, кг/кг	0,5
максимальное отношение хвои к сучьям, кг/кг	0,5
Текущее отношение сучьев к стволу, кг/кг	0,49996171
Текущее отношение хвои к сучьям, кг/кг	0,44671784

Рисунок 8 – Механические ограничения при развитии ассимиляционного аппарата

При этом в модели реализован процесс отмирания элементов дерева через определенные для каждого элемента интервалы времени. Реализованный в модели процесс отмирания элементов заключается в вычитании из текущих значений биомассы значений ее прироста, произошедшего ранее (ровно на период отмирания). При этом так же ведется учет общей биомассы, в которой не учитывается отмирание элементов (кроме хвои).

Запись текущих результатов в таблицу

Полученные на текущем шаге результаты необходимо записывать в отдельную таблицу ввиду того, что в результате повторения циклов моделирования текущие значения многократно переписываются. Для этого в программе используется следующий код, который позволяет создавать на отдельном рабочем листе таблицу с выходными данными моделирования.

For I = 1 To Sheets("Рабочий лист").Cells(22, 7).Value
 'присваиваем текущим значениям динамических параметров значения
 следующего шага'

For m = 1 To 4

Sheets("Выходные данные").Cells(3 + I, 1 + m).Value =
 Sheets("Рабочий лист").Cells(2 + m, 7).Value 'записываем текущие
 значениям в таблицу результатов живой биомассы'

Sheets("Выходные данные").Cells(3 + I, 5 + m).Value =
 Sheets("Рабочий лист").Cells(2 + m, 8).Value 'записываем текущие
 значениям в таблицу результатов общей биомассы'

Next m

Следующие операции шага моделирования

Next I

Получаемая в процессе моделирования таблица выходных данных
 представлена на рисунке 9.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		0							
2					<i>живая</i>	<i>общая</i>			
3		<i>хвоя</i>	<i>сучья</i>	<i>ствол</i>	<i>корни</i>	<i>хвоя</i>	<i>сучья</i>	<i>ствол</i>	<i>корни</i>
4	1	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
5	2	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
6	3	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
7	4	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
8	5	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
9	6	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
10	7	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
11	8	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
12	9	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
13	10	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
14	11	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
15	12	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
16	13	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
17	14	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
18	15	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
19	16	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
20	17	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
21	18	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
22	19	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
23	20	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002
24	21	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002

Рисунок 9 – Таблица выходных данных моделирования

Изменение параметров объекта и внешних условий моделирования

В течение шага изменяется текущее состояние объекта – осуществляется прирост биомассы дерева. Для этого в расчетной схеме определяются значения для следующего шага моделирования, а затем они подставляются с помощью приведенного ниже программного кода в ячейки для текущего состояния объекта и используются на следующем шаге моделирования (Рис. 10).

```
For I = 1 To Sheets("Рабочий лист").Cells(22, 7).Value 'присваиваем  
текущим значениям динамических параметров значения следующего шага'
```

Предыдущие операции шага моделирования

```
For k = 1 To 4
```

```
A(k) = Sheets("Рабочий лист").Cells(17 + k, 7).Value 'присваиваем  
значения следующего шага для Живой биомассы переменным'
```

```
B(k) = Sheets("Рабочий лист").Cells(17 + k, 8).Value 'присваиваем  
значения следующего шага для Общей биомассы переменным'
```

```
Next k
```

```
For n = 1 To 4
```

```
Sheets("Рабочий лист").Cells(2 + n, 7).Value = A(n)  
'присваиваем текущим значениям Живой биомассы значения переменных'
```

```
Sheets("Рабочий лист").Cells(2 + n, 8).Value = B(n)  
'присваиваем текущим значениям Общей биомассы значения переменных'
```

```
Next n
```

```
Sheets("Рабочий лист").Cells(23, 7).Value = I 'счетчик  
Циклов'
```

```
Next I
```

<i>текущее состояние</i>				
Масса живая		общая		Зависимые параметры
хвоя, кг	3892,91525	3892,91525		Площадь хвои, м2
сучья, кг	84,847661	8714,483439		площадь кроны, м2
ствол, кг	167,7255553	17430,30165		Эффективная хвоя с учетом про
корни, кг	0	4,793675607		Получаемая энергия, кДж
суммарная, кг	4145,488467	30042,49402		Энергия, необходимая на дыха
по таблицам значений		ср. знач.	Сигмы	Кислород, получаемый при ды
температура, оС		-13,	0,1	моль СН2О по кислороду
инсоляция ср.дневная, Вт/м2		100	0,1	Энергия, доступная для синтеза
продолжительность дня, ч		10		моль СН2О по энергии
Влажность воздуха, % от макс абсолютной		0	0	Углекислый газ, доступный для
Влажность почвы, %		10	0,01	моль СН2О по СО2
следующее состояние		Живая	общая	Условие ограничения реакции(
хвоя, кг	3883,796126	3883,796126		фосфор, 7-микро, 8-вода)
сучья, кг	84,847661	8714,483439		количество глюкозы на шаг, кг
ствол, кг	167,7255553	17430,30165		Количество биомассы на шаг, кг
корни, кг	0	4,793675607		
количество циклов	73000			
счетчик	73000			

Рисунок 10 – Использование значений для следующего состояния в качестве текущих на следующем шаге

При выполнении цикла моделирования изменяется значение счетчика, который используется для определения текущего состояния моделирования и для циклического изменения внешние параметры по описанной выше схеме.

Измененные в течение шага входные параметры подставляются в расчетную часть на следующем шаге моделирования. Затем производится расчет уже с новыми входными величинами. Циклы повторяются, пока счетчик не достигнет требуемого периода моделирования.

В результате моделирования происходит изменение состояния объекта, которое можно проиллюстрировать также в виде графика (Рис. 11).

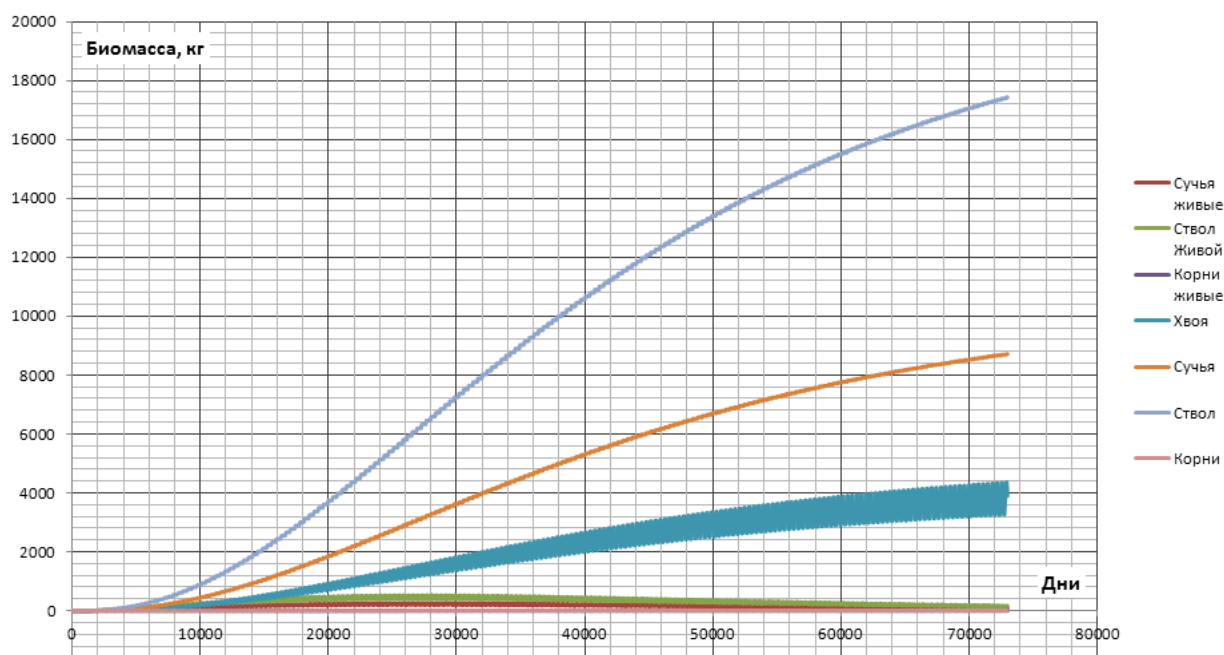


Рисунок 11 – Результаты моделирования с помощью разработанной модели

Выводы

1. При моделировании нестационарных процессов роста биологических объектов необходимо учитывать особенности образования и накопления биомассы, стимулирующие и ограничивающие эти процессы факторы, влияние на эти процессы совокупности внешних факторов, значительно изменяющихся в течение года. Для этого важным является выбор адекватного и оптимального принципа моделирования.

2. Разработана математическая модель развития и накопления биомассы дерева, позволяющая установить зависимость между условиями развития дерева и количеством накапливаемое в процессе роста биомассы в различных элементах дерева.

3. Таким образом, общий вид график соответствует S-образной кривой роста [8], что позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели и возможности использования ее результатов для прогнозирования роста деревьев.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Соглашение № 14.В37.21.0301).

Библиографический список

1. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
2. Карев Г. П. Структурные модели лесных экосистем / Г. П. Карев // Сибирский экологический журнал. – 1999. - №4. – с. 381-396.
3. Карев, Г. П. Структурные модели и динамика древесных популяций: дис... докт. физ.-мат. наук : 03.00.02 / Карев Георгий Петрович - Москва, 1993. - 224 с.
4. Галицкий В.В. Несвободный рост дерева. q3D-модель [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/019>, свободный.
5. Колобов А.Н. Численно-аналитическое исследование модели роста дерева в условиях конкуренции за свет / А.Н. Колобов // Математическая биология и биоинформатика. – 2012. – Т.7. – №1. – с. 125-138.
6. Омелько А. М. Модель роста деревьев темнохвойных пород на основе L-систем/ А. М. Омелько // Сибирский экологический журнал. – 2006. - №2. – с. 181-188.
7. Омелько А. М. Математическая модель роста дерева в древостое темнохвойных пород/ А. М. Омелько // Биологические исследования на горнотаежной станции. Сб. научн. трудов – 2006. – Вып.10. – с. 86-98.
8. Медведев С. С. Физиология растений. – СПб.:Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004.