

УДК 574.36

UDC 574.36

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА
ИСКУССТВЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ЛЕСОВ**

**MODELLING OF ARTIFICIAL ENERGY
FORESTS GROWTH**

Романов Евгений Михайлович
д.с.-х.н., профессор

Romanov Evgeniy Mikhailovich
Dr.Sci.Agr., professor

Онучин Евгений Михайлович
к.т.н., доцент

Onuchin Evgeniy Mikhailovich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Нуреева Татьяна Владимировна
к.с.-х.н., доцент
*Поволжский государственный технологический
университет, Йошкар-Ола, Россия*

Nureyeva Tatyana Vladimirovna
Cand.Agric.Sci., associate professor
*Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola,
Russia*

В статье приведено описание методологии и подходов к моделированию роста искусственных энергетических лесов. Рассмотрены особенности моделирования роста искусственных энергетических лесов

The article describes the methodology and the approaches to the modeling of the growth of artificial energy forests. The features of the growth modeling of the artificial energy forests are shown

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

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

Введение

В настоящее время все большее количество стран рассматривают перспективы выращивания энергетических плантаций с целью получения возобновляемой энергии и биотоплива. Всестороннее и многоплановое развитие энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии, становится приоритетным направлением технологического и социально-экономического развития России, что отражено в основополагающих документах. Исследования в данном направлении требуют новых знаний и подходов к ускоренному выращиванию древесных пород для получения биомассы, изучение новых возможностей управления ростом растений на биофизической и физиологической основе. Поиск подходов к управлению ростом, как отдельного дерева, так и насаждения в целом, неразрывно связан с математическим моделированием, которое даёт возможность прогнозировать результаты хозяйственного воздействия на насаждения. В этой связи особое значение имеет имитационное моделирование, развитие

которого связано с использованием компьютерной техники. Моделирование роста и продуктивности лесных насаждений приобретает ещё большую важность при комплексном рассмотрении эколого-лесоводственных, технологических и технических аспектов выращивания, заготовки и переработки энергетической биомассы в пределах территориальных агролесоводственных биоэнергетических комплексов (ТАЛБЭК), создание которых является одним из наиболее перспективных направлений вовлечения в активный хозяйственный оборот малопродуктивных территорий нашей страны.

В настоящее время все большее применение при исследовании лесоводственных и технико-технологических систем находят методы математического моделирования, в том числе и при изучении сложных биологических систем, к которым относятся растения. Математическое моделирование роста и производительности насаждений является неотъемлемой составляющей инструментария управления сложным комплексом биологических, экологических и технических систем, который из себя представляет ТАЛБЭК. Необходимость познания закономерностей процесса накопления биомассы древесными растениями, происходящего под действием множества внешних и внутренних факторов, связана с решением многих задач теоретического и практического значения. При этом необходимо заметить, что, несмотря на качественные сдвиги в области фундаментальной биологии и в частности физиологии растений, вопрос изучения закономерностей накопления фитомассы древесными растениями далёк от окончательного решения, что связано с недостатком знаний в области физиологических процессов и влияния на них внешних и внутренних факторов и хозяйственных воздействий. Имитационное моделирование роста и развития насаждений с использованием всеобщих закономерностей и направленности физиологических процессов позволяет выйти на новый уровень управления биологическими системами с целью

получения возобновляемой биомассы как альтернативного источника энергии.

Математическое моделирование при изучении закономерностей продукционного процесса древесных растений может успешно применяться при прогнозировании и управлении процессом формирования урожая древесной массы на энергетических плантациях, выращивание которых, согласно Лесного кодекса может осуществляться на землях лесного фонда и иных категорий. Перспективным направлением может быть вовлечение в активную экономическую жизнь неиспользуемых сельскохозяйственных земель и формирование на них ТАЛБЭК, основным видом деятельности которых является производство товарных энергоносителей на основе биоресурсов энергетических лесных культур.

Объект и предмет исследования

Энергетические лесные культуры представляют собой лесонасаждения искусственного происхождения, структура и параметры которых оптимизированы для получения максимального количества энергии в видах, востребованных как внутри ТАЛБЭК, так и на внешних рынках. Осуществление целенаправленного производства древесины по примеру сельского хозяйства для промышленных нужд, в том числе для производства биотоплива на специальных плантациях, предполагает достижение более высоких темпов роста искусственных насаждений с максимально ранним сроком получения конечной продукции – фитомассы древесины.

Предметом исследования является установления качественных и количественных зависимостей между накоплением биомассы в искусственных энергетических лесах и условиями их роста

Знание особенностей протекания физиологических процессов древесных растений и возможность управления ростом и продуктивностью

является основной теоретической базой для получения максимальных урожаев фитомассы при производстве биотоплива.

Методология моделирования

Развитие направления, связанного с получением возобновляемой энергии из биомассы древесины требует разработки новых лесоводственных концепций, основанных на познании закономерностей продукционного процесса при поиске возможных способов наиболее эффективного управления ростом и развитием древесных растений и прогнозировании урожаев. Математическое моделирование роста и развития древесных растений является наиболее эффективным методом выбора рационального и эффективного воздействия на ход их течения, позволяющее выбрать из множества возможных вариантов решения наиболее результативные, в соответствие с поставленными задачами. Однако, модели должны быть максимально упрощённым средством – авторы моделей должны непременно ограничивать себя, чтобы достичь хороших результатов познания [12].

Поток научных публикаций по моделированию лесных экосистем, возросший в последние десятилетия, дал основание классифицировать полученные модели [3]. Выделяются гар-модели [1], модели индивидуальных деревьев или модели предсказаний роста и урожайности [3].

Российские исследователи выделили следующие группы моделей от более детальных к более обобщённому: модели отдельного дерева, описывающие рост дерева с различной степенью детализации процессов, индивидуально-ориентированные модели уровня древостоя рассматривают рост каждого дерева в лесной популяции, принимая во внимание конкуренцию или перераспределение ресурсов в пределах посадки; модели насаждения имитируют динамику лесных массивов или экосистем с <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/24.pdf>

обобщёнными характеристиками, причём иногда с очень детальным рассмотрением экофизических процессов [9,10].

По способам реализации модели подразделяются на регрессионные (эмпирические, феноменологические) и эколого-физиологические (объясняющие, механизменные) [3]. Первые базируются на массовом экспериментальном материале, к которым относятся таблицы хода роста. Вторые основаны на представлении о механизме функционирования модели целого объекта. Их верификация производится по экспериментальным данным, что позволяет проверить достоверность гипотезы. Кроме того, эколого-физиологические модели подразделяются на аналитические, имитационные и аналитико-имитационные. Имитационное моделирование активно стало развиваться в течение нескольких последних десятилетий [1-10].

Особенностями имитационного моделирования лесных экосистем в России можно назвать: 1) были двух- или трехмерными, 2) использовалась концепция дискретного описания онтогенеза лесных видов, основанная на морфологии дерева и физиологических стадиях развития; 3) развивалось одновременно и под влиянием аналитического моделирования. Лишь некоторые модели рассматривали рост дерева на основе моделирования фотосинтеза или использовали полный углеродный баланс [11]. Самой полной эколого-физиологической моделью признана FINNFOR [11], соединяющей очень детальные и взаимодействующие субмодели погодных условий (осадки, температура, излучение, облачность и т.д.), изменение параметров почвы (влажность, температура, разложение подстилки, минерализация), а также рост и динамику деревьев.

Фундаментальная ориентированность разработанных моделей (изучение естественных природных процессов и механизмов), сложность/невозможность учёта технологических воздействий на лес и оценки их результатов. Необходимо моделирование для оценки

целесообразности тех или иных технологических операций, а также обоснование оптимальных режимов их выполнения.

Схема моделирования

В основу разработки предложенной имитационной модели был взят принцип эколого-физиологического моделирования. Модель представляет идеализированно-упрощённую версию реальных процессов с основным перечнем переменных и параметров, формально описывающих моделируемый объект, в качестве которого принято единичное дерево. Основным системообразующим фактором формирования и развития лесных экосистем в пределах территорий с умеренным климатом является доступная фотосинтетически активная радиация (ФАР).

Общая схема разработанной модели роста энергетического леса представлена на рис. 1.



Рисунок 1 - Общая схема моделирования роста энергетических лесов

В соответствии с задачами моделирования модель отражает как собственно эндогенную динамику насаждения, так и влияние на процесс роста технологических воздействий, что позволяет условно выделить в модели блок насаждения, включающий в себя относительно обособленные модели территории, отдельного дерева, взаимодействия деревьев, а также блок технологических воздействий на насаждение.

Модель территории содержит информацию о форме и размерах участка, на котором располагается энергетический лес, его рельефе, характеристиках почвенно-грунтовых условий, а также о погодно-климатических условиях. Модель отдельного дерева отражает процессы синтеза биомассы отдельным деревом, а модель взаимодействия деревьев имитирует процессы конкуренции деревьев за ресурсы роста (площадь питания и солнечный свет). Блок моделирования технологических воздействий позволяет корректировать ход роста насаждения за счёт выполнения определённых технологических операций, влияющих либо на территорию энергетического леса (например, обработка почвы или внесение удобрений), либо на характер взаимодействия между деревьями (например, рубки ухода). При этом возможно моделирование как идеальных воздействий, без учёта сопутствующих изменений, так и с учётом последних (уплотняющее воздействие движителей технологических машин, прорубка волоков и технологических коридоров и т. д.). Разработанная модель во многом базируется на ранее разработанных моделях лесной территории, взаимодействия деревьев и <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/24.pdf>

технологических воздействий, дополненных моделью роста отдельного дерева, в которой выполняется имитация базовых физиологических процессов синтеза биомассы.

С учётом физиологических основ моделирования роста отдельного дерева и на базе принятых допущений разработана имитационная модель синтеза биомассы отдельным деревом, схема которой представлена на рис. 2. В соответствии с принятой концепцией дискретно-событийного моделирования принят временной шаг модели в один день, в течение которого все параметры модели считаются условно постоянными и скачкообразно изменяются в начале следующего шага. Непосредственно в самом дереве выделены следующие функциональные компоненты – хвоя (ассимилирующий аппарат), сучья и ствол (силовой каркас), корни (обеспечение водой и питательными веществами), при этом каждый компонент характеризуется двумя параметрами общей и живой физиологически активной массой. Процесс моделирования выполняется по следующей схеме. Первоначально определяется количество солнечной энергии, воспринимаемой ассимиляционным аппаратом. Это количество определяется с учётом моделирования погодно-климатических условий, реализованного в виде коррелированных случайных процессов интенсивности солнечного света, температуры, влажности и скорости движения воздуха.

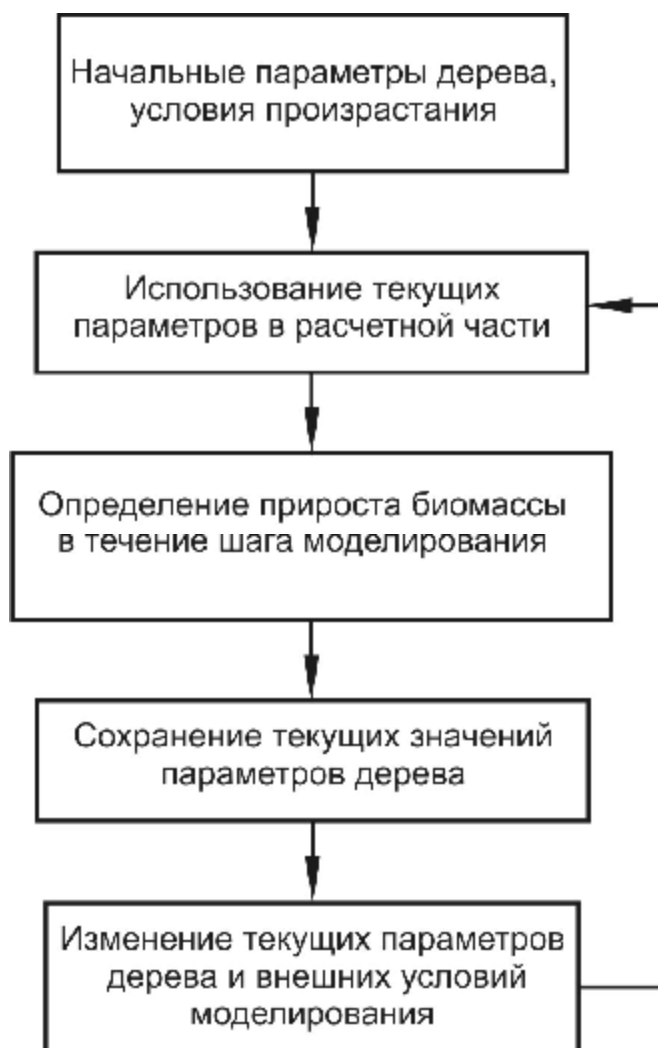


Рисунок 2 - Схема имитационной модели синтеза биомассы отдельным деревом

$$\text{Энергия} = \text{Средняя инсоляция} \times \text{Эфф. площадь AA}$$

При этом эффективная площадь ассимиляционного аппарата, определяемая по схеме пологого конуса (рис. 3), находится по формуле

$$\begin{aligned}
 \hat{E} \hat{I} \hat{y} \hat{o} \hat{.} \hat{i} \hat{e} \hat{i} \hat{.} \hat{a} \hat{a} \hat{u} \hat{A} \hat{A} &= p \times \hat{E} \hat{I} \hat{y} \hat{o} \hat{.} \hat{o} \hat{i} \hat{\delta} \hat{i} \hat{u} \hat{e} \hat{\delta} \hat{i} \hat{i} \hat{u} \hat{1} \times \\
 &\times \left(\frac{\hat{E} \hat{I} \hat{y} \hat{o} \hat{.} \hat{i} \hat{e} \hat{i} \hat{.} \hat{o} \hat{i} \hat{\delta} \hat{i} \hat{u} \hat{e} \hat{\delta} \hat{i} \hat{i} \hat{u} \hat{1} \times \hat{I} \hat{a} \hat{n} \hat{n} \hat{a} \hat{\delta} \hat{a} \hat{i} \hat{e}}{\hat{E} \hat{I} \hat{y} \hat{o} \hat{.} \hat{o} \hat{i} \hat{\delta} \hat{i} \hat{u} \hat{e} \hat{\delta} \hat{i} \hat{i} \hat{u} \hat{2} \times \hat{E} \hat{I} \hat{y} \hat{o} \hat{.} \hat{i} \hat{i} \hat{e} \hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{i} \hat{o} \hat{n} \hat{a}} \right)^{\frac{2}{3}}
 \end{aligned}$$

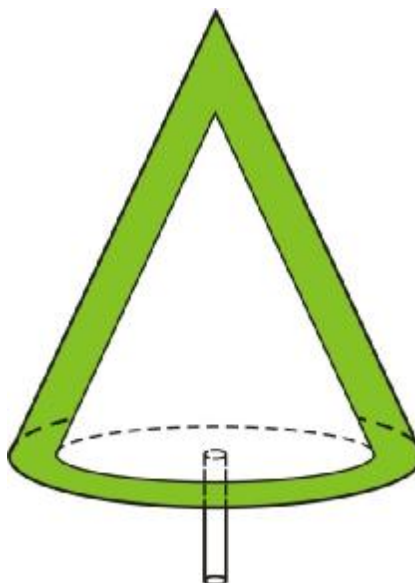


Рисунок 3 - Схема пологого конуса

При это модель учитывает, что при понижении температуры ниже критической процесс восприятия солнечной энергии останавливается.

Далее определяется количество энергии, расходуемое деревом на дыхание

$$\begin{aligned}
 & \dot{Y}_i \dot{a} \dot{\delta} \dot{\alpha} \dot{\epsilon} \dot{y} \dot{a} \dot{u} \dot{\delta} \dot{\alpha} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{y} = \dot{E} \dot{i} \dot{y} \dot{o} \cdot \dot{a} \dot{\epsilon} \dot{\epsilon} \dot{y} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{y} \cdot 1 \left(\frac{\dot{I} \dot{\epsilon} \dot{\delta} \cdot \dot{o} \dot{\alpha} \dot{i} \dot{r} \dot{a} \dot{\delta} \dot{\alpha} \dot{o} \dot{\delta} \dot{\alpha} - \dot{O} \dot{\alpha} \dot{i} \dot{r} \cdot \dot{\alpha} \dot{\epsilon} \dot{\epsilon} \dot{i} \dot{a} \dot{\alpha} \dot{y} \dot{o} \cdot}{10} \right) \times \\
 & \times (\dot{E} \dot{i} \dot{y} \dot{o} \cdot \dot{a} \dot{\epsilon} \dot{\epsilon} \dot{y} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{y} \cdot 2 \times \dot{I} \dot{a} \dot{n} \dot{n} \dot{a} \dot{a} \dot{a} \dot{\delta} \dot{\alpha} \dot{\alpha} \dot{a} + \dot{E} \dot{i} \dot{y} \dot{o} \cdot \dot{a} \dot{\epsilon} \dot{\epsilon} \dot{y} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{y} \cdot 3 \times \dot{A} \dot{\epsilon} \dot{\delta} \dot{\alpha} \epsilon \dot{i} \cdot \dot{a} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{\delta} \dot{o} \dot{\delta} \dot{a}) ,
 \end{aligned}$$

и пропорционально этой энергии количество поступившего в дерево кислорода

$$\dot{E} \dot{\epsilon} \dot{n} \dot{\epsilon} \dot{i} \dot{\delta} \dot{i} \dot{a} = \frac{\dot{Y}_i \dot{a} \dot{\delta} \dot{\alpha} \dot{\epsilon} \dot{y} \dot{a} \dot{u} \dot{\delta} \dot{\alpha} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{y}}{\dot{Y}_i \dot{a} \dot{\delta} \dot{\alpha} \dot{\epsilon} \dot{y} \dot{i} \dot{a} \dot{a} \cdot \dot{\epsilon} \dot{\epsilon} \dot{n} \dot{\epsilon} \dot{i} \dot{\delta} \dot{i} \dot{a} \dot{a}} .$$

Остаток энергии расходуется на синтез биомассы.

На следующем этапе определяется количество воды, подаваемое к ассимиляционному аппарату корнями дерева, которое находится по формуле

При достаточном содержании веществ в почве расчет проводится по формуле:

$$\dot{A} \dot{i} \dot{a} \dot{a} = \dot{I} \dot{\epsilon} \dot{i} \dot{u} \dot{a} \dot{a} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{i} \dot{\delta} \dot{i} \dot{a} \dot{\epsilon} \times \dot{E} \dot{i} \dot{y} \dot{o} \cdot \dot{o} \dot{n} \dot{a} \dot{i} \dot{a} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{y} \dot{a} \dot{i} \dot{a} \dot{u} \times \dot{E} \dot{i} \dot{y} \dot{o} \cdot \dot{a} \dot{\epsilon} \dot{\delta} \dot{\alpha} \epsilon \dot{i} \dot{i} \dot{n} \dot{o} \dot{\epsilon} \dot{i} \dot{i} \dot{\epsilon} \dot{a} \dot{u} .$$

Далее по характеристикам наличия в почве подвижных питательных веществ определяется их количество, поступившее в дерево с водой.

Таким образом, находится поступившее в дерево за шаг моделирования количество компонентов, необходимых для синтеза биомассы. Затем на базе материально-энергетического баланса (рис. 4) определяется лимитирующий компонент, по которому и рассчитывается биомасса, синтезированная за шаг моделирования.



Рисунок 4 - Материально-энергетического баланса синтеза биомассы

Данная биомасса в процессе моделирования может быть направлена на развитие одного из четырёх функциональных элементов дерева (хвои, сучьев, ствола, корней). Один из элементов выбирается в соответствии с выявленным лимитирующим компонентом данного шага. Если за получение этого компонента отвечают корни, то модельная биомасса идёт на увеличение корней, если, хвоя то проверяются условия на предельное соотношение массы хвои, сучьев и ствола, после чего синтезированная за шаг моделирования биомасса поступает в один из этих элементов дерева.

На завершающем этапе из живой биомассы элемента дерева вычитается отмершая на данном шаге моделирования биомасса, достигшая предельного возраста.

Общая схема входных, выходных и внутренних параметров модели, а также используемых при моделировании представлена на рис. 5. Коэффициенты модели были определены в процессе обучения модели по известным эмпирическим моделям роста насаждений.

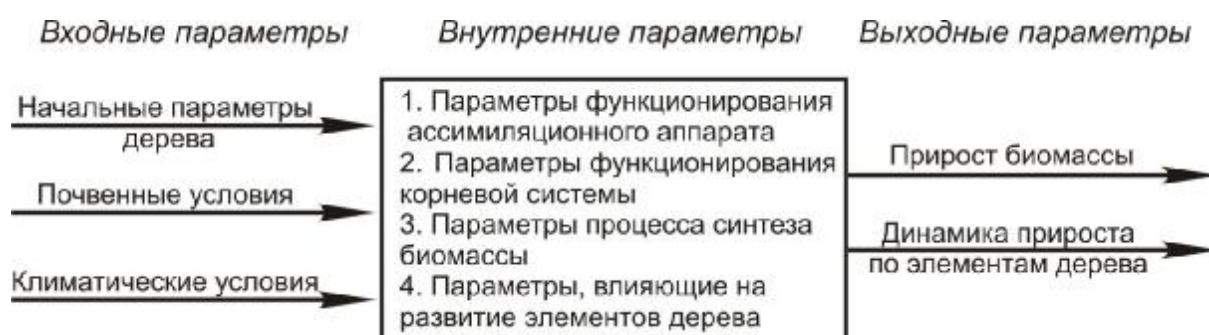


Рисунок 5 - Схема входных, выходных и внутренних параметров модели

Принципы моделирования

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 экзогенных факторов, существенно изменяющихся в течение года.

Для моделирования был выбран алгоритм, 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 расчётах в рамках шага моделирования принимается, что условия являются постоянными, и расчёт ведётся по известным уравнениям накопления биомассы при фотосинтезе. Шаг моделирования выбирается с учётом соблюдения постоянства условий в течение него.

Затем осуществляются запись значений для шага моделирования в таблицу результатов. Производится изменение параметров объекта с учётом протекания процессов в течение шага моделирования и внешних условий в зависимости от их циклических колебаний. На следующем шаге моделирования, изменённые входные параметры подставляются в расчётную часть.

Результаты моделирования, представленные в виде графиков, приведены на рисунке 6.

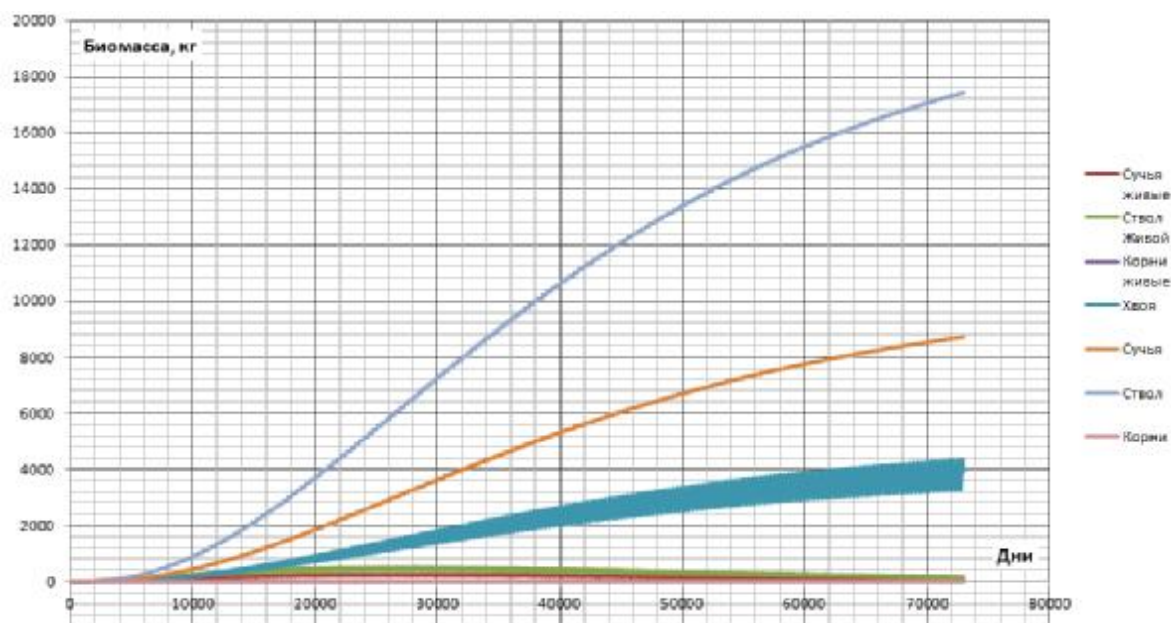


Рисунок 6 - Схема входных, выходных и внутренних параметров модели

Выводы

Анализ существующих методов математического моделирования указывает на предпочтительное использование эколого-физиологического подхода, основанного на закономерностях протекания физиологических процессов в условиях изменяющихся внешних факторов.

Разработанная имитационная математическая модель позволяет прогнозировать рост дерева и формирование его фитомассы, а также давать предварительную оценку эффективности проектируемых хозяйственных мероприятий.

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. Колобов А.Н. Применение имитационной компьютерной модели к анализу динамики древостоя // Математические методы в экологии. Тезисы докладов Третьей Всероссийской школы молодых ученых. Петрозаводск, 24-29 августа, 2008 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 65-67.
2. Омелько А.М. Модель роста деревьев темнохвойных пород на основе L-систем // Сибирский экологический журнал. №2, 2006. С. 181-188
3. Чумаченко Имитационное моделирование многовидовых разновозрастных лесных насаждений. Дис..... д-ра биол. Наук по спец. 06.00.16.
4. Галицкий В.В., Комаров А.С. О моделировании роста растений // Известия АН СССР. Сер. Биология. 1979.
5. Галицкий В.В., Комаров А.С. Численное моделирование динамики популяций растений // Математическое моделирование. Нелинейные дифференциальные уравнения математической физики (Ред. А.А.Самарский). М.: Наука, 1987. С. 52-109.
6. Оя Т. Моделирование сукцессии древостоя // В кн. Пааль И.Л., Оя Т.А., Колодяжный С.Ф. Таксономический и временной континуум растительности. Таллинн. 1989. С. 119-148.
7. Оя Т. Опыт имитационного моделирования роста древостоя умеренного пояса // Проблемы современной экологии. Иссл. Прир. Экосистем Эстонии. Материалы Респ. Конф. Тарту. 1978. С. 59-61.
8. Пегов Л.А. Изучение динамики ценопопуляции березы при помощи имитационной модели // Экология популяций. Часть 2. М.: Изд-во АН СССР. 1987. С. 225-228.
9. Чертов О.Г. Математическая модель экосистемы одного растения // Журн. общ. биол. 1983. Т. 44. С. 406-414.

10. Чертов О.Г., Комаров А.С. Имитационная модель динамики органического вещества почв // Вестник С.-Петербургского ун-та. 1996. Сер.3, вып.1. С. 104-109.
11. Kellomaki S., Vaisanen H. Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. // Ecol. Model. 1997. № 97 (1-2). P. 121-140.
12. Демаков Ю.П. Диагностика устойчивости лесных экосистем (методические и методологические аспекты). – Йошкар-Ола, 2000. – 415 с. 5.