

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РОСТА ДЕРЕВА

Л.В. Щеголева, Д.В. Гудач, А.В. Кабонен✉

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33

alexkabonen@mail.ru

Приведен разработанный алгоритм моделирования роста дерева на примере ели европейской (*Picea abies*) для трехмерной визуализации развития растения. Предложена особая структура классов, формирующих внутреннюю структуру дерева в виде набора соединенных между собой побегов, которые вырастают из почек. В них хранятся числовые значения характеристик структуры (возраста, диаметра ствола, длины побегов и объема фотосинтетической биомассы дерева) и пространственные координаты расположения конструктивных элементов на родительском объекте (прошлогоднем побеге). Алгоритм моделирования роста дерева ели включает генерацию случайных значений для характеристик побегов и почек. Предложенный алгоритм позволяет реализовать структурное разнообразие ветвящихся процессов и стохастический характер развития в условиях произрастания деревьев в Республике Карелия.

Ключевые слова: *Picea abies*, архитектура кроны, модель роста дерева, стохастическое моделирование, структура классов

Ссылка для цитирования: Щеголева Л.В., Гудач Д.В., Кабонен А.В. Алгоритм моделирования и визуализации роста дерева // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 1. С. 50–57.
DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-50-57

Моделирование роста растений востребовано в различных областях науки и, как правило, имеет прикладное значение. Модели роста и развития растений представляют собой эффективные инструменты для успешного решения задач повышения урожайности в сельскохозяйственном секторе экономики [1], а также имеют значительный потенциал и в других сферах экономической деятельности [2]. Использование моделей может способствовать увеличению производительности, оказывать содействие при снижении антропогенной нагрузки на окружающую среду [3]. Кроме того, такие модели служат инструментом для оценки роста биомассы [4], в частности, в лесном хозяйстве и на лесозаготовках.

Для достоверного понимания и визуальной проверки текущих и прогнозируемых биологических процессов развития растений указанные модели можно представить не только в виде математических выражений, но и с помощью построения трехмерных графиков роста и развития не только отдельных растений, но и насаждений, состоящих из их многочисленных видов. Для трехмерной визуализации роста растения важно составить достоверное описание структуры развития архитектуры его кроны [5]. При этом возникают методические трудности при описании пространственной организации отдельного дерева, обусловленные структурным разнообразием процессов ветвления, которые определяются его генотипом и фенотипической пластичностью роста, которая зависит от воздействия внешних факторов. Использование

междисциплинарных подходов и современных достижений в области компьютерных технологий позволит преодолеть эти трудности.

В настоящее время разработано большое количество различных моделей в области исследования роста деревьев. Большинство моделей — это S-образные функции, которые отражают динамику изменения какого-либо показателя (высоты, объема ствола и др.) в зависимости от времени (возраста) [6] или в зависимости от изменений других показателей, например, объема древесины от диаметра ствола. В моделях, представленных в работах [7–10], учтено влияние таких внешних условий, как характер дренажа, расстояние между деревьями и др. Параметры таких моделей рассчитываются на основе эмпирических данных и различаются для разных видов деревьев, климатических и иных условий их произрастания. В некоторые модели добавлены случайные значения [12]. В работе [11] сформулированы аспекты, которые следует учитывать при разработке подобных моделей, в частности, биологию развития деревьев, статистические свойства и характеристики ранее допущенных ошибок построения моделей, методы проверки адекватности модели реальным условиям, анализ чувствительности модели к изменению исходных данных.

Для реализации трехмерного моделирования разработаны специальные программные комплексы [8, 10]. В работе [13] рассматривается возможность применения современных информационных технологий для оценки роста деревьев, которые опираются на нейронные сети, онтологию и технологии экспертных систем.

Современные технологии моделирования пространственных объектов включают в себя не только расчет значений заданных показателей, но и визуализацию объектов. При этом моделирование дерева должно включать в себя структуру хранения данных, алгоритмы преобразования исходных данных, алгоритмы статистической оценки параметров модели и алгоритмы визуализации дерева.

В работе [14] представлен метод сопоставления цифровых изображений и абстракции ветвей на основе скелета дерева. Согласно алгоритму моделирования создаются трехмерные модели деревьев и визуализируются процессы их роста на основе одного реального изображения дерева.

Виртуальные модели деревьев, построенные с помощью бинокулярной системы стерео зрения и реконструирующие ветвление цитрусовых деревьев, используются для помощи роботам — сборщикам плодов для распознавания препятствий и их преодоления в реальной обстановке [15].

В настоящем исследовании представлен вероятностный подход для моделирования роста дерева на примере произрастания ели европейской (*Picea abies* L.) в климатических условиях Республики Карелия. Предложена структура данных и построены оценки распределений для некоторых характеристик ели.

Цель работы

Цель работы — разработка алгоритма моделирования роста ели европейской на основе вероятностного подхода с возможностью ее трехмерной визуализации при изменяющихся влияющих параметрах.

Материалы и методы

Объектами исследования служили 10 разновозрастных деревьев ели европейской (5 деревьев в возрасте 15 лет, 5 деревьев в возрасте 34 года), естественно произрастающих на заповедной территории Ботанического сада Петрозаводского государственного университета. В международном лесорастительном районировании территория исследования относится к бореальной зоне; в России в действующей системе лесозащитного районирования — к подзоне среднетаежных лесов. Географические координаты участка исследования — 61° 84' с. ш., 34° 41' в. д. Тип леса — ельник черничный.

Выбор объектов обоснован необходимостью установления разной интенсивности роста в зависимости от возраста дерева. У каждого дерева отобраны и измерены по 30 побегов. Длина побегов измерена с помощью сантиметровой линейки, толщина побегов — штангенциркулем, диаметр стволов — мерной вилкой, углы расположения почек относительно поверхности на побеге — угломерами. Количество почек считали визуально.

В основу модели положен теоретический подход моделирования развития хвойных деревьев, основанный на терминальной модели роста «почка → побег → почка → ...», представленный в работе [16].

Для визуализации трехмерной модели дерева был разработан программный комплекс, основанный на стандарте OpenGL. Комплекс состоит из двух модулей. Первый модуль выполняет подготовку исходных данных и реализует процесс моделирования роста растения на языке программирования C++ с использованием библиотек *glew*, *glfw*, *glm*, *boost*, *free_type*, выполняется на CPU. Второй модуль выполняет отрисовку модели с использованием возможностей GPU на языке программирования GLSL.

Результаты и их обсуждение

Биология развития ели. Биологический рост дерева ели европейской для последующего трехмерного моделирования можно описать следующим образом. Через прорастающее семя появляется всход (первый росток; первый побег), который позднее становится главным стволом дерева. На этом побеге имеется фотосинтезирующая биомасса (хвоя), которая будет расти вместе с побегом. Когда сезонный рост побега заканчивается, на его поверхности образуются новые почки, из которых впоследствии (в следующем году) будут образовываться новые побеги, где снова появятся новые почки. Поскольку ель европейская относится к моноподиальным хвойным, определена ее иерархическая структура ветвления роста побегов (главная ось, оси 2-го, 3-го порядка и т. д.), а сам рост побегов данного дерева всегда детерминирован апикальной почкой, что способствует непрерывному росту новых побегов. Почки образуются преимущественно на молодых побегах, обычно в количестве 3 шт. на концах побегов, одна из которых (верхушечная почка) становится продолжением главной оси родительского побега, а остальные — оси 2-го порядка.

Почки данного дерева подразделяются на два типа: вегетативные и генеративные. Вегетативные почки дают только новые побеги. Генеративные почки, в свою очередь, подразделяются на два подтипа: микростробилы (мужские колоски) и мегастробилы (женские шишки). Первые умирают после процесса пыления. Вторые растут в виде шишек и опадают. Оба типа генеративных почек с точки зрения визуализации можно охарактеризовать как видоизмененные побеги. В этом случае есть общее правило: генеративные почки образуются спустя 10...15 лет жизни дерева. Таким образом, ствол — это набор побегов, растущих один за другим. Таким же образом каждая ветка

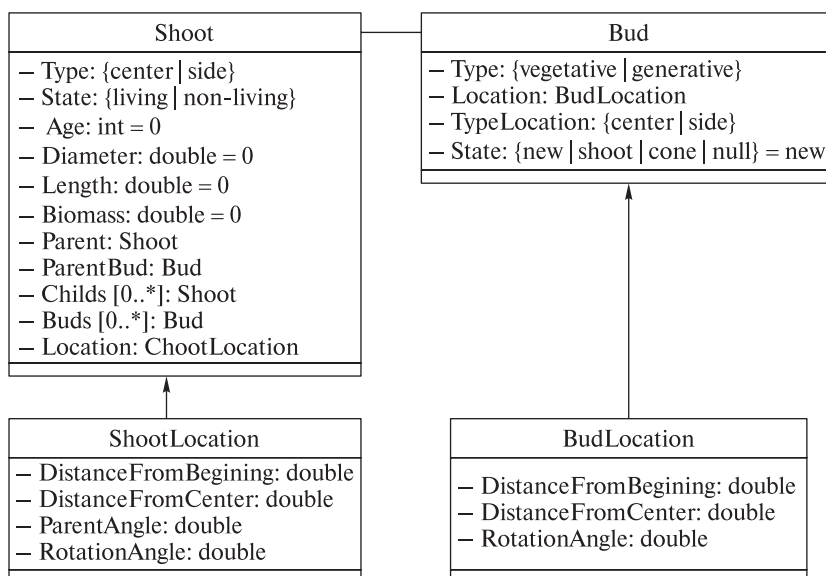


Рис. 1. Диаграмма классов для представления структуры и состояния дерева
Fig. 1. Class diagram for the structure representation and state of a tree

дерева представляет собой набор растущих один за другим побегов. Главный побег в диаметре ежегодно добавляет одно годовое кольцо, другие побеги также имеют тенденцию к годовому увеличению диаметра. Хвоя растет на каждом новом побеге и остается на нем на 4...7 лет. Помимо роста может быть запущен и механизм отмирания побегов, если на дочерних побегах нет фотосинтетической биомассы и почек.

Вероятностный рост растений во многом зависит от климатических условий места произрастания. Годовое начало и конец роста побега, а также его длина обычно определяются и зависят от погодных условий каждого года и возраста растения. Среди основных вероятностных погодных факторов, влияющих на рост дерева, выделяют температуру, влажность и осадки. Вероятностное влияние оказывает и солнечная активность. Эти факторы определяют вероятностный характер процессов роста каждого дерева.

Алгоритм индивидуального развития дерева ели. Определим два основных элемента для роста ели: почки и побег. Как указывалось ранее, почки данного дерева подразделяются на два типа. По истечении какого-либо времени вегетативная почка превращается в побег. Каждый новый побег связан с одним родительским побегом и является родительским побегом для нескольких дочерних побегов. Этот факт позволяет использовать структуру графа для описания состояния объекта в каждый момент времени.

Определим следующую объектную структуру для хранения информации о модели дерева. Основным классом является класс Shoot (побег) со свойствами: тип, состояние, возраст, диаметр, длина, объем биомассы, расположение на роди-

тельском побеге, ссылка на родительский побег, массив ссылок на дочерние побеги и массив ссылок на почки. Класс Bud (почка), в свою очередь, включает в себя свойства: тип и расположение на побеге. Дополнительные классы ShootLocation и BudLocation хранят информацию об относительном расположении побегов и почек и выделены в отдельные классы для обеспечения процесса визуализации. Диаграмма классов приведена на рис. 1.

Эта структура данных объединяет содержательную информацию о дереве, которая необходима для принятия решений, и пространственную информацию, необходимую для визуализации дерева в виртуальном пространстве.

На основе этой структуры данных был смоделирован тестовый вариант трехмерной модели 8-летнего дерева ели европейской. На рис. 2 представлено сравнение визуализации трехмерной модели дерева (рис. 2, б) с прототипом (рис. 2, а), на основе которого создавалась трехмерная модель для визуализации.

Всего в тестовой трехмерной модели представлено 313 побегов. Высота всей модели — 31,5 см, диаметр ствола у основания — 1,5 см, диаметр кроны — 45 см, длина нижних боковых побегов в сумме (по центральному побегу) — 22 см. Данные характеристики модели согласуются с исследуемым прототипом дерева.

Для моделирования роста дерева с учетом случайной природы роста и влияния различных факторов были разработаны функции, решающие следующие задачи:

- генерация типа почки — $f_{т.п.}$;
- генерация расположения почки на побеге — $f_{л.п.}$;
- генерация количества почек на побеге — $f_{к.п.}$;

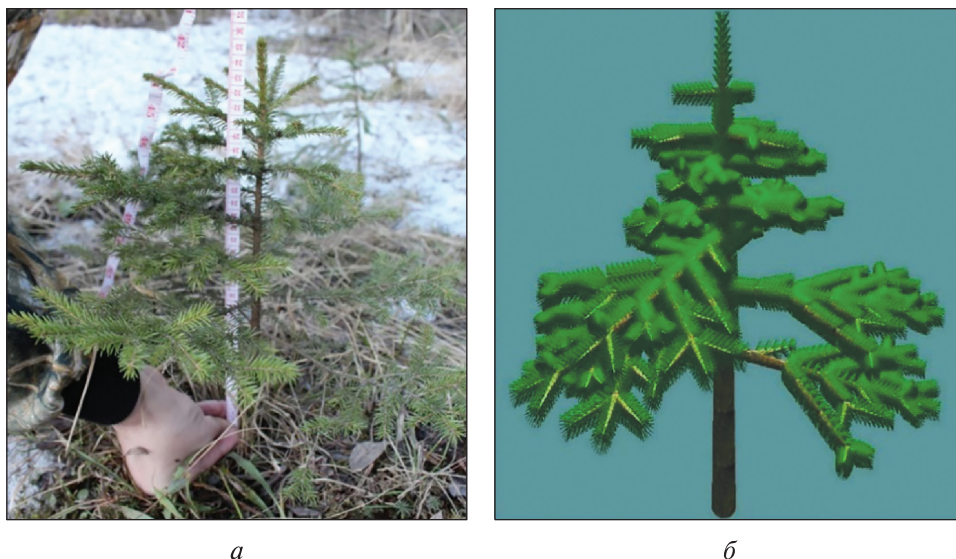


Рис. 2. Сравнение дерева ели европейской (возраст 8 лет) с усредненной трехмерной моделью: *а* — исследуемая ель; *б* — трехмерная модель
Fig. 2. Comparison of the studied common spruce tree with a three-dimensional model at the age of 8 years: *a* — investigated spruce; *b* — 3D-model

- генерация побегов — $f_{п}$;
- генерация диаметра годового кольца — $f_{г.д}$;
- генерация длины побега — $f_{д.п}$;
- генерация прироста фотосинтезирующей биомассы побегов — $f_{бм}$;
- генерация смертности побега — $f_{г.пб}$;
- генерация смертности почки — $f_{г.пч}$.

Функция $f_{т.п}$ определяет одно из двух значений типа почки: «вегетативная» или «генеративная». Значение типа почки генерируется случайным образом на основе следующего распределения (P): $P(\text{вегетативная}) = 0,9$; $P(\text{генеративная}) = 0,1$; при возрасте дерева менее 10 лет: $P(\text{вегетативная}) = 1,0$. Данное распределение было получено на основе подсчета вегетативных и генеративных почек на исследуемых деревьях; распределение $P(\text{вегетативная}) = 1,0$ для дерева в возрасте менее 10 лет согласуется с правилом образования генеративных почек на данном дереве (спустя 10...15 лет жизни дерева).

Функция $f_{к.п}$ определяет целое численное значение количества почек из диапазона [1, 17]. Значение количества почек зависит от возраста и длины побега. Если возраст побега один год, то на его конце генерируется до 5 почек (преимущественно 3). Помимо концевых почек на побегах образуются и другие почки. Таким образом, значение, определяемое функцией $f_{к.п}$ — это сумма случайно сгенерированного числа концевых почек и случайно сгенерированного количества неконцевых почек.

На рис. 3 представлена гистограмма плотности распределения числа почек на побеге в зависимости от возраста исследуемых деревьев. Так, на более молодых деревьях образуется больше почек,

количество которых с возрастом сокращается. У 15-летнего дерева на одном побеге в среднем образуется 7 почек, максимум — 17, а у 34-летнего дерева — в среднем 3, максимум — 6. Вероятно, это связано не только с возрастом дерева, но и с длиной самих побегов. Соответственно, на более длинных побегах (в молодом возрасте) образуется большее количество почек, чем на коротких (у взрослых деревьев).

Функция $f_{г.д}$ определяет случайно сгенерированное значение прироста годового кольца дерева из диапазона (0, 10]. Выбранный диапазон прироста диаметра (в миллиметрах) характерен для рассматриваемого вида дерева в условиях Республики Карелия.

Функция $f_{д.п}$ определяет случайно сгенерированное действительное значение длины побега из диапазона [2, 30]. Значение длины побега зависит от возраста дерева. Как правило, наибольшая интенсивность роста побегов у деревьев данного вида характерна в возрасте до 25 лет. Так, в 15-летнем возрасте максимальный годовой прирост составил 300 мм, а средний прирост — 90 мм в год (рис. 4). У деревьев в возрасте 34 года максимальный прирост составил 70 мм, а средний — 50 мм.

Функция $f_{бм}$ определяет величину изменения значения фотосинтезирующей биомассы, зависящее от длины побега; $f_{п}$ — экземпляр класса побег на основе существующих почек; $f_{г.пб}$ — логическое значение состояния побега, зависящее от дочерних побегов (значение «истина» означает гибель побега); $f_{г.пч}$ — случайно сгенерированное логическое значение состояния почки (значение «истина» означает гибель почки).

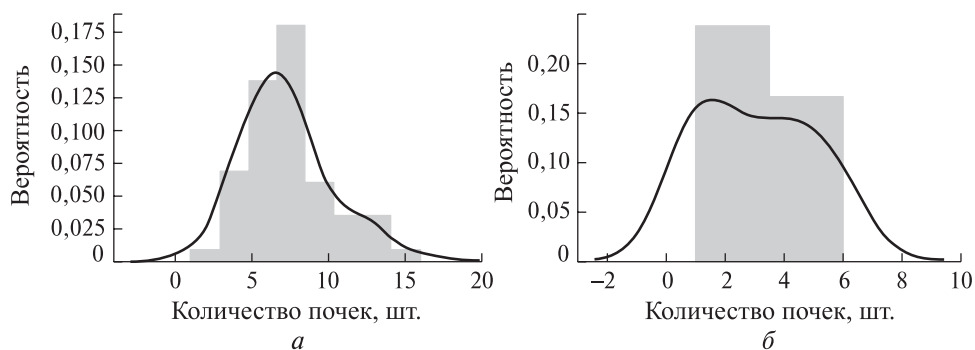


Рис. 3. Гистограмма плотности распределения числа почек: *a* — для деревьев в возрасте 15 лет; *b* — для деревьев в возрасте 34 года

Fig. 3. Histogram of the density bud distribution: *a* — for trees aged 15 years; *b* — for trees aged 34 years

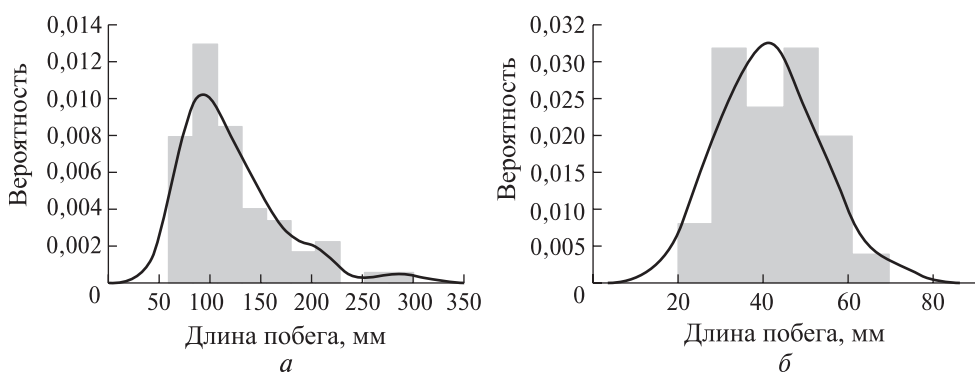


Рис. 4. Гистограмма плотности распределения длины побегов: *a* — для деревьев в возрасте 15 лет; *b* — для деревьев в возрасте 34 года

Fig. 4. Histogram of the density shoots length distribution: *a* — for trees aged 15 years; *b* — for trees aged 34 years

Функция $f_{л.п}$ генерирует два значения расположения почки: расстояние от начала побега (в мм) и угол поворота вокруг побега (в градусах).

Границы диапазонов, представленные в описаниях функций, указаны для условий произрастания в Республике Карелия. Они могут различаться по регионам и в зависимости от условий произрастания в пределах регионов. Поэтому выбор параметров работы функций должен проводиться в зависимости от условий региона, для которого выполняется моделирование.

Кроме того, распределения вероятностей перечисленных ранее случайных величин зависят от погодных условий конкретного модельного года. Следовательно, параметры распределений должны рассматриваться в контексте погодных условий.

Алгоритм моделирования зависит от дискретности моделирования времени. Рассмотрим моделирование состояния дерева на следующий год.

Алгоритм:

Для каждой почки с $Bud.Type = \langle \text{вегетативный} \rangle$ выполняются следующие действия:

1. Используя функцию $f_{г.пч}$, генерируется логическое значение, которое определяет станет ли почка побегом или погибнет;

2. Если почка умирает, выполняется операция: $Bud.State = \langle \text{null} \rangle$, и осуществляется переход к следующей почке;

3. Иначе: выполняется операция: $Bud.State = \langle \text{Shoot} \rangle$;

4. Создается новый побег;

5. Для нового побега $Shoot$ выполняются следующие действия:

5.1. $Shoot.Age = 0$;

5.2. $Shoot.Length = f_{д.п}$;

5.3. $Shoot.Diameter = f_{г.д}$;

5.4. $Shoot.Biomass = f_{б.м}$;

5.5. $Shoot.Parent = Bud.Parent$;

5.6. $Shoot.ParentBud = Bud$;

5.7. $Shoot.Location.DistancefromBeginning = Bud.Location.DistancefromBeginning$;

5.8. $Shoot.Location.DistancefromCenter = Bud.Location.DistancefromCenter$;

5.9. $Shoot.Location.RotationAngle = Bud.Location.RotationAngle$;

5.10. $Shoot.Type = Bud.Type$;

5.11. Если $Shoot.Type = \langle \text{center} \rangle$, то $Shoot.Location.ParentAngle = 0$;

5.12. Иначе: $Shoot.Location.ParentAngle = 0,785398$;

5.13. $Shoot.State = \langle \text{living} \rangle$.

Для каждого побега с $\text{Shoot.State} = \text{«living»}$ выполняются следующие действия:

1. $\text{Shoot.Age} = \text{Shoot.Age} + 1$;
2. Если все дочерние побеги умерли и почек нет, с использованием функции $f_{\text{гл}}$ генерируется логическое значение, определяющее останется ли побег живым;
3. Если побег погибнет, то выполняются следующие действия:
 - 3.1. $\text{Shoot.State} = \text{«unliving»}$;
 - 3.2. $\text{Shoot.Biomass} = 0$;
 - 3.3. Выполняется переход к следующему побегу;
4. $\text{Shoot.Diameter} = \text{Shoot.Diameter} + f_{\text{гд}}$;
5. $\text{Shoot.Biomass} = \text{Shoot.Biomass} + f_{\text{бм}}$;
6. Если $\text{Shoot.Age} < 15$:
 - 6.1. Используя функцию $f_{\text{кп}}$, генерируется целочисленное значение, определяющее сколько почек будет на побеге;
 - 6.2. Для каждой новой почки:
 - 6.2.1. Для первой почки выполнить $\text{Bud.Type} = \text{«center»}$, для остальных $\text{Bud.Type} = \text{«side»}$;
 - 6.2.2. Добавить почку в массив почек текущего побега;
 - 6.2.3. $\text{Bud.Type} = f_{\text{тп}}$;
 - 6.2.4. $\text{Bud.Location.DistanceFromBeginning}$, $\text{Location.RotationAngle} = f_{\text{лп}}$;
 - 6.2.5. $\text{Bud.Location.DistanceFromCenter} = \text{Shoot.Diameter} / 2$;
 - 6.2.6. $\text{Bud.State} = \text{«new»}$.

Таким образом, в результате работы алгоритма в структуру данных, описывающую состояние дерева на текущий год, будут добавлены новые элементы, которые описывают состояние дерева в следующем году, и будут изменены значения некоторых характеристик дерева, такие как возраст, диаметр, объем биомассы, которые меняются ежегодно.

Выводы

Построенная структура классов подходит для моделирования роста ели европейской и последующей ее визуализации в виртуальном пространстве. Подробное представление о местонахождении побега по отношению к родительскому побегу позволяет моделировать одновременный рост нескольких побегов и учитывать влияние побегов друг на друга, например, в получении солнечного света.

Алгоритм моделирования состояния ели в следующем году включает в себя случайно генерируемые величины, эмпирические распределения которых получены на основе наблюдений для района произрастания в Республике Карелия. Таким образом, предложенная модель роста дерева позволяет получить разные варианты развития

отдельного дерева или лесного массива, что делает визуализацию более естественной, чем набор одинаковых объектов.

Функции, генерирующие случайные значения, должны учитывать не только характеристики самого объекта, а также внешние воздействия на объект, например, погодные условия.

Дальнейшие исследования будут включать в себя оценку влияния погодных условий на сезонные характеристики роста дерева и использование этих результатов в описанных функциях, которые выполняют генерацию случайных значений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-316-90044.

Список литературы

- [1] Добрачев Ю.П., Соколов А.Л. Модели роста и развития растений и задача повышения урожайности // Природообустройство, 2016. № 3. С. 90–96.
- [2] Zhu X.G., Zhang G.L., Tholen D. The next generation models for crops and agro-ecosystems // Sci. China Inf Sci., 2011, v. 54, pp. 589–597
- [3] Беленков А.И. Перспективы использования точного земледелия при производстве растениеводческой продукции // Нивы Зауралья, 2014. № 5 (116). С. 61–63.
- [4] Ruiz-Ramos M., M'inguez M.I. ALAMEDA, a structural-functional model for Faba Bean crops: morphological parameterization and verification // Annals of Botany, 2006, v. 97(3), pp. 377–388
- [5] Henke M., Huckemann S., Kurth W., Sloboda B. Reconstructing leaf growth based on non-destructive digitizing and low-parametric shape evolution for plant modelling over a growth cycle // Silva Fennica, 2014, v. 48, no. 2, p. 23.
- [6] Vanclay J.K. Growth models for tropical forests: A synthesis of models and methods // Forest Science, 1995, v. 41, no. 1, pp. 4–42.
- [7] Miina J. Spatial growth model for Scots Pine on drained peatland // Silva Fennica, 1994, v. 28(1), pp. 15–27.
- [8] Schröder J., Röhle H., Gerold D. Modeling individual-tree growth in stands under forest conversion in East Germany // Eur J Forest Res, 2007, v. 126, pp. 459–472.
- [9] Lee W.-K., Gadow K., Chung D.-J., Lee J.-L., Shind M.-Y. DBH growth model for Pinus densiflora and Quercus variabilis mixed forests in central Korea // Ecological Modelling, 2004, v. 176, iss. 1–2, pp. 187–200.
- [10] Pan Y., Raynal D.J. Decomposing tree annual volume increments and constructing a system dynamic model of tree growth // Ecological Modelling, 1995, v. 82, iss. 3, pp. 299–312.
- [11] Vanclay J.K., Skovsgaard J.P. Evaluating forest growth models // Ecological Modelling, 1997, v. 98, no. 1, pp. 1–12.
- [12] Garcia O. A stochastic differential equation model for height growth of forest stands // Biometrics, 1983, v. 39, pp. 1059–1072.
- [13] Li Y., Zhang W.-Q., Liu H., Yang H.-Q., Liu X.-N. Research of Modern Information Technology on Tree Growth Management Decision Making Model // Applied Mechanics and Materials, 2013, v. 347–350, p. 2418.
- [14] Kim J., Jeong I. Single Image-Based 3D Tree and Growth Models Reconstruction // ETRI Journal, 2014, v. 36, iss. 3, pp. 450–459.

- [15] Li Y., Li X., Tian S. Real-Time Construction of Fruit Tree Model Based on Images // *Eurasia J. of Mathematics, Science and Technology Education*, 2017, v. 13(7), pp. 4035–4047.
- [16] Gavrikov V.L., Karlin I.V. A dynamic model of tree terminal growth // *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, v. 23, pp. 326–329.
- [17] Zhu X.G., Zhang G.L., Tholen D. The next generation models for crops and agro-ecosystems // *Sci. China Inf Sci.*, 2011, v. 54, pp. 589–597.

Сведения об авторах

Щеголева Людмила Владимировна — д-р техн. наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики Петрозаводского государственного университета, schegoleva@petsu.ru

Гудач Даниил Васильевич — аспирант кафедры прикладной математики и кибернетики Петрозаводского государственного университета, daniil-gudach@rambler.ru

Кабонен Алексей Валерьевич ✉ — аспирант кафедры технологии и организации лесного комплекса Петрозаводского государственного университета, alexkabonen@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2021.

Одобрено после рецензирования 01.09.2021.

Принята к публикации 06.12.2021.

ALGORITHM FOR TREE GROWTH MODELING AND VISUALIZATION

L.V. Shchegoleva, D.V. Gudach, A.V. Kabonen ✉

Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185640, Petrozavodsk, Karelia, Russia

alexkabonen@mail.ru

The developed algorithm for modeling the growth of a tree using the example of European spruce (*Picea abies*) for three-dimensional visualization of plant development is presented. A special structure of classes is proposed that form the internal structure of a tree by a set of interconnected shoots that grow from buds. They store the numerical characteristics of the structure (age, trunk diameter, shoots length and the volume of tree photosynthetic biomass) and the spatial coordinates of structural elements on the parent object (last year's shoot). The algorithm for modeling the growth of a spruce tree includes the generation of random values for the characteristics of shoots and buds. The proposed algorithm makes it possible to realize the structural diversity of branching processes and the stochastic nature of development under the conditions of tree growth in the Republic of Karelia.

Keywords: *Picea abies*, crown architectonics, tree growth model, stochastic modeling, class structure

Suggested citation: Shchegoleva L.V., Gudach D.V., Kabonen A.V. *Algoritm modelirovaniya i vizualizatsii rosta dereva* [Algorithm for tree growth modeling and visualization]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 50–57. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-50-57

References

- [1] Dobrachev Yu.P., Sokolov A.L. *Modeli rosta i razvitiya rasteniy i zadacha povysheniya urozhaynosti* [Models of plant growth and development and the problem of increasing yields]. *Prirodoobustroystvo* [Prirodoobustroystvo], 2016, no. 3, pp. 90–96.
- [2] Zhu X.G., Zhang G.L., Tholen D. The next generation models for crops and agro-ecosystems. *Sci. China Inf Sci.*, 2011, v. 54, pp. 589–597
- [3] Belenkov A.I. *Perspektivy ispol'zovaniya tochnogo zemledeliya pri proizvodstve rastenievodcheskoy produktsii* [Prospects for the use of precision farming in the production of crop products]. *Nivy Zaural'ya* [Niva Zauralia], 2014, no. 5 (116), pp. 61–63.
- [4] Ruiz-Ramos M., M'inguez M.I. ALAMEDA, a structural-functional model for Faba Bean crops: morphological parameterization and verification. *Annals of Botany*, 2006, v. 97(3), pp. 377–388
- [5] Henke M., Huckemann S., Kurth W., Sloboda B. Reconstructing leaf growth based on non-destructive digitizing and low-parametric shape evolution for plant modelling over a growth cycle. *Silva Fennica*, 2014, v. 48, no. 2, p. 23.
- [6] Vanclay J.K. Growth models for tropical forests: A synthesis of models and methods. *Forest Science*, 1995, v. 41, no. 1, pp. 4–42.
- [7] Miina J. Spatial growth model for Scots Pine on drained peatland. *Silva Fennica*, 1994, v. 28(1), pp. 15–27.
- [8] Schröder J., Röhle H., Gerold D. Modeling individual-tree growth in stands under forest conversion in East Germany. *Eur J Forest Res*, 2007, v. 126, pp. 459–472.
- [9] Lee W.-K., Gadow K., Chung D.-J., Lee J.-L., Shind M.-Y. DBH growth model for *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* mixed forests in central Korea. *Ecological Modelling*, 2004, v. 176, iss. 1–2, pp. 187–200.
- [10] Pan Y., Raynal D.J. Decomposing tree annual volume increments and constructing a system dynamic model of tree growth. *Ecological Modelling*, 1995, v. 82, iss. 3, pp. 299–312.
- [11] Vanclay J.K., Skovsgaard J.P. Evaluating forest growth models. *Ecological Modelling*, 1997, v. 98, no. 1, pp. 1–12.
- [12] Garcia O. A stochastic differential equation model for height growth of forest stands. *Biometrics*, 1983, v. 39, pp. 1059–1072.

- [13] Li Y., Zhang W.-Q., Liu H., Yang H.-Q., Liu X.-N. Research of Modern Information Technology on Tree Growth Management Decision Making Model. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, v. 347–350, p. 2418.
- [14] Kim J., Jeong I. Single Image-Based 3D Tree and Growth Models Reconstruction. *ETRI Journal*, 2014, v. 36, iss. 3, pp. 450–459.
- [15] Li Y., Li X., Tian S. Real-Time Construction of Fruit Tree Model Based on Images. *Eurasia J. of Mathematics, Science and Technology Education*, 2017, v. 13(7), pp. 4035–4047.
- [16] Gavrikov V.L., Karlin I.V. A dynamic model of tree terminal growth. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, v. 23, pp. 326–329.
- [17] Zhu X.G., Zhang G.L., Tholen D. The next generation models for crops and agro-ecosystems. *Sci. China Inf Sci.*, 2011, v. 54, pp. 589–597.

The research was carried out with the financial support of the RFBR as part of a scientific project № 20-316-90044.

Authors' information

Shchegoleva Lyudmila Vladimirovna — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Applied Mathematics and Cybernetics, Petrozavodsk State University, schegoleva@petsu.ru

Gudach Daniil Vasilievich — Pg. of the Department of Applied Mathematics and Cybernetics, Petrozavodsk State University, daniil-gudach@rambler.ru

Kabonen Aleksey Valerievich — Pg. of the Department of Technology and Organization of the Forestry Complex of Petrozavodsk State University, alekxabonen@mail.ru

Received 01.06.2021.

Approved after review 01.09.2021.

Accepted for publication 06.12.2021.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest