

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

SYSTEMS ANALYSIS AND TRAINING SYSTEMS

УДК 004.853

А. С. Бируля, Н. И. Гурин

Белорусский государственный технологический университет

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ РОСТА ДЕРЕВА НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО АДАПТИВНОГО АССЕТА

Статья посвящена созданию динамических ассетов в среде Unity для моделирования роста дерева при различных условиях произрастания. Разработанные ассеты предназначены для визуализации роста дерева с учетом условий произрастания и дальнейшего использования в различных информационных системах. Разработанные ассеты основываются на многолетних обобщенных исследованиях в области ботаники и информационных технологий. В работе проанализированы различные системы математического моделирования произрастания и роста дерева, а также средства для его визуализации. Также описана построенная на основе таблиц, обобщенная модель произрастания дерева, в которой учитываются наиболее важные показатели, – бонитет почв, количество влаги и солнечного света, получаемых деревом в процессе роста. На основе исследований разработана коллекция ассетов визуализации дерева ели, отражающая разные этапы развития дерева – от посадки до зрелости – в различных условиях, и предложена методика формирования оптимальных коллекций на основе концепции динамического ассета для использования полученной динамической визуализации роста дерева при проведении процессов озеленения, лесовосстановления, лесоустройства.

Ключевые слова: трехмерная визуализация дерева, динамический ассет, коллекция ассетов.

Для цитирования: Бируля А. С., Гурин Н. И. Визуализация модели роста дерева на основе динамического адаптивного ассета // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2022. № 2 (260). С. 114–120.

A. S. Birulia, N. I. Gurin

Belarusian State Technological University

VISUALIZATION OF A TREE GROWTH MODEL BASED ON A DYNAMIC ADAPTIVE ASSET

The article is devoted to the creation of dynamic assets in the Unity environment for modeling the growth of a tree under various growing conditions. The developed assets are designed to visualize the growth of a tree, taking into account the growing conditions and further use in various information systems. The developed assets are based on many years of generalized research in the field of botany and information technology. The paper analyzes various systems of mathematical modeling of the tree growth, as well as tools for its visualization. A generalized model of tree growth is also described, built on the basis of tables, which takes into account the most important indicators of tree growth — soil quality, the amount of moisture and sunlight received by tree during growing. Based on the research, a collection of spruce tree visualization assets was developed, reflecting different stages of tree development, from planting stage to maturity, in various conditions, and a method was proposed for the formation of optimal collections based on the concept of a dynamic asset to use the obtained dynamic visualization of tree growth during landscaping processes, reforestation, forest management.

Key words: 3D visualization of a tree, dynamic asset, collection of assets.

For citation: Birulia A. S., Gurin N. I. Visualization of a tree growth model based on a dynamic adaptive asset. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2022, no. 2 (260), pp. 114–120 (In Russian).

Введение. Для прогнозирования последствий различных чрезвычайных ситуаций в лесных массивах и на залесенных парковых и производственных территориях необходимо иметь интерактивную модель развития отдельного дерева. Каждое дерево развивается по характерным для него закономерностям и в зависимости от окружающих условий его произрастания, изменяющихся с течением времени. В этой работе для визуализации на экране модели роста дерева используются предварительно разработанные динамические ассеты, цифровые объекты, преимущественно состоящие из однотипных данных, неделимые сущности, которые представляют часть контента и обладают заданными свойствами в среде интерактивной трехмерной графики Unity.

Основная часть. Для создания динамического ассета визуализации модели роста дерева необходимо учесть, прежде всего, закономерности произрастания дерева определенной породы, например ели обыкновенной, в естественной среде. До возраста 10 лет ель растет очень медленно, в первые пять лет после посадки она прибавляет в росте по 6–9 сантиметров в год и в пятилетнем возрасте достигает всего до 30–50 см в высоту и 30 см в диаметре кроны. Длина хвои ели составляет в среднем 10–25 мм и располагается на ветках по спирали. Предельной высоты взрослое дерево этого вида достигает в 40–60 лет. Именно в таком возрасте у ели наступает зрелость. В целом же она может произрастать на протяжении 250–300 лет [1]. Требования к освещенности у данного вида невелики, но наиболее приемлемо хорошо освещенное место, хотя в начале роста ель может страдать от солнечных ожогов. Лучше растет на влажной почве, не переносит долговременную засуху, существенно замедляя рост. Предпочитает песчаные и кислые почвы.

Ветвление дерева ели моноподиальное, характеризующееся тем, что главный стембель растет своей вершиной до конца жизни растения, обладая как бы неограниченным верхушечным ростом, который доминирует над ростом боковых побегов. В классическом виде моноподиальная модель представлена на рис. 1. Ветвь первого порядка пронумерована цифрой «1», ветви второго и третьего порядка пронумерованы соответственно цифрами «2» и «3».

Развивающиеся из боковых почек побеги растут, как и главный стембель, сохраняя моноподиальное ветвление. В результате у деревьев формируются высокий прямой ствол и ветвление [2].

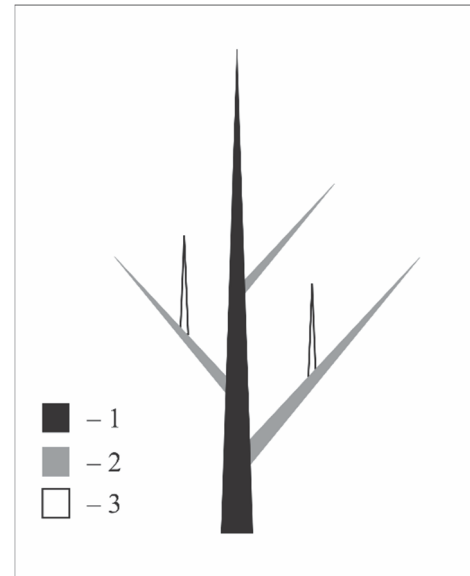


Рис. 1. Классическая схема моноподиального ветвления

Математически она наиболее просто была описана Хондой [3] через L-системы и имеет геометрическую интерпретацию, представленную на рис. 2.

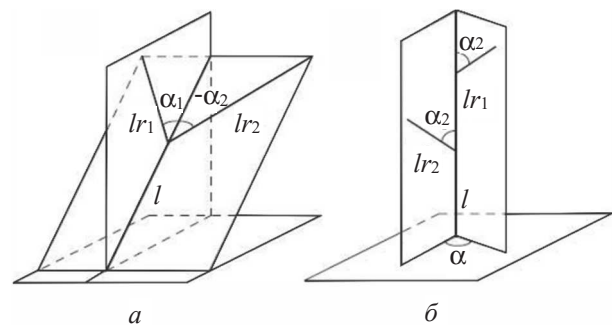


Рис. 2. Геометрическая интерпретация модели ветвления Хонды

Модель Хонды для ветвления дерева относится к категории простых со следующими допущениями:

- сегменты дерева прямые, площадь их поперечного сечения не рассматривается;
- в течение итерации материнский сегмент производит два дочерних;
- длина двух дочерних сегментов короче материнского в r_1 и r_2 раз;
- материнский сегмент и два его дочерних находятся в одной плоскости ветвления. Дочерние сегменты выходят из материнского под углами ветвления α_1 и α_2 ;
- в связи с действием силы гравитации плоскость ветвления является близкой к горизонтальной и перпендикулярна к материнскому сегменту.

Исключение делается для веток, присоединенных к главному стволу. В этом случае используется постоянный угол расхождения α , который экспериментально варьируется от 20° до 90° в зависимости от породы дерева.

Взяв за основу расчета параметров r_1 и r_2 метод золотого сечения, пропорции которого не раз экспериментально находились именно при ветвлении хвойных растений, легко рассчитать рост и ветвление ветви на каждом этапе жизненного цикла.

Одно из правил L-системы Хонды записывается следующим образом:

$$p1: A(l,w) : \rightarrow \\ !(w)F(l)[\&(a_0)B(l \cdot r_2, w \cdot wr)] / (d)A(l \cdot r_1, w \cdot wr),$$

что означает при каждой итерации от вершины главной оси A отходит сегмент стебля F и боковая вершина B . Константы r_1 и r_2 указывают на уменьшение длины для прямого и бокового сегментов, α_0 и α_1 – углы ветвления и δ – угол расхождения. На основании параметров, принятых в модели Хонды, при помощи программ для трехмерного моделирования Blender и 3Ds Max и их инструментария была произведена визуализация модели роста ели обыкновенной на разных этапах развития, начиная от саженца до взрослого дерева. Рост имитируется с помощью вытягивания ветвей и с учетом особенностей их расположения и ветвления, указанных выше. Исходя из вышеописанной модели ветвления Хонды и учета экспериментальных данных роста дерева ели, а также внося некоторые корректировки для большей реалистичности результата, можно разработать визуализацию модели ели на каждый год ее развития.

Динамический ассет растущего дерева рассматривается как массив или коллекция префабов, шабло-

нов для создания экземпляров хранимого объекта в сцене, содержащих в себе свойства объекта, построенных в графическом редакторе для каждого года развития объекта и внедренных в проект Unity, которые затем вызываются на сцену в заданный момент времени соответствующей командой.

В частности, в динамический ассет может быть включено дерево на определенном этапе развития или другой объект, который может появиться в любом месте сцены, но который будет использоваться лишь изредка. Кроме того, можно загрузить динамический ассет из отдельного файла или через URL, чтобы сократить время начального скачивания или добавить в проект взаимозаменяемый контент.

В динамическом ассете можно указывать взаимосвязи объектов или последовательность их вызова при обращении к ним. К примеру, в одной коллекции хранятся префабы для нормального, идеального роста ели, роста ели на неблагоприятной почве или в среде, роста ели при неблагоприятных климатических условиях. При задании начальных значений обращения к коллекции можно вызвать то, что на данном этапе нужно пользователю.

Система взаимосвязей в таком архиве ассетов имеет древовидную структуру, используемую для переходов между взаимовлияющими параметрами по годам. Она представлена на рис. 3. Выбор итогового динамического ассета основывается на таблице основных параметров, от которых зависит развитие дерева: почвы, освещенности, влажности, значения которых разбиты на три условных класса, соответствующих: *оптимальному* – 1, *среднему* – 2 и *удовлетворительному* – 3 уровням влияния на развитие дерева.

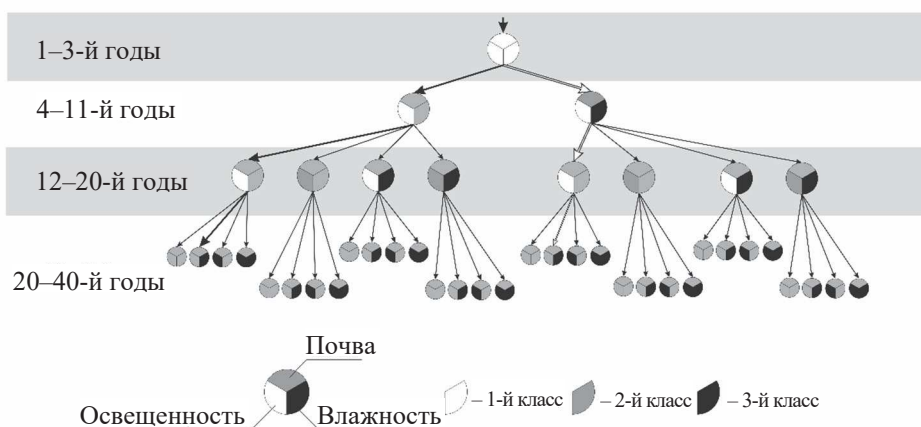


Рис. 3. Граф перехода между ассетами по периодам

Фрагмент таблицы таких значений приведен ниже для основных параметров, определяющих условия произрастания дерева до 40 лет.

**Параметры перехода по коллекции
в соответствии с заданными условиями**

Возраст, лет	Почва, класс	Освещенность, класс	Влажность, класс
1–3	1	1	1
4–11	2	1	2, 3
12–20	2	1, 2	2, 3
20–40	2	2, 3	2, 3

В общем случае такая таблица может иметь значительно большее количество строк для учета возраста свыше 40 лет, а также столбцов с учетом других менее значимых параметров: фотокинетики, влияния вредителей и заболеваний и т. п., от которых также зависит рост дерева, но уже в меньшей степени.

Параметр *почва* связывается с ее бонитетом, являющимся количественным показателем плодородности почвы, определяется по разным показателям, в данной модели он разделен на 3 класса, хотя в общем случае количество классов ранжируется в зависимости от региона произрастания. В данной работе некоторые наиболее плодородные и наименее плодородные классы объединены, так как степень их влияния на рост дерева незначительна. *Освещенность* – это уровень освещения, необходимый для развития растения. В данной работе освещение разделяется на три уровня: оптимальное, обеспеченное при выращивании в питомнике, сочетание естественного и фитоламп, достаточное, нормальное среднесуточное и среднегодовое без отклонений до возраста смыкания крон, при котором оно ухудшается, и недостаточное, возникающее при смыкании крон либо у елей, изначально произрастающих в густых насаждениях. *Влажность* в данной работе – количество влаги, получаемое растением для роста и развития, при этом учитывается влажность самой почвы, так как в общем случае обычно рассматривается влажность как баланс осадков, включающий в себя поверхностные стоки, подземные стоки, испарение и транспирацию. В данной работе различаются три степени влажности почвы.

В исследовании рассматривалась ель обыкновенная со следующими условиями произрастания.

Первоначально ель выращивается в специализированном питомнике, по достижении 3-летнего возраста высаживалась в открытый грунт.

Почва: 1 – почвосмесь для первичного выращивания хвойного растения; 2 – супесчаная или суглинисто-песчаная почва, как наиболее приемлемая для пересадки растения из тепличной среды; 3 – глинистая, плотная почва, неблагоприятная для высадки ели.

Освещенность: 1 – оптимальное освещение для нормального роста и развития ели (10–20 тыс. лк); 2 – приглушенное (достаточное) освещение в условиях конкуренции (4–10 тыс. лк), 3 – недостаточное освещение для нормального развития ели, или освещение с существенным отклонением от нормы (менее 3 тыс. лк).

Влажность: 1 – оптимальная (26–28% влажности почвы); 2 – достаточная, способная поддерживать развитие и жизнедеятельность растения (30–50% влажности почвы); 3 – влажность, существенно превышающая оптимальную, или существенно недостаточная, при довольно длительном превышении или недостатке на ранних этапах развития ведущая к гибели растения (на ранних этапах развития саженца 10–14 дней засухи).

В таблице приведены значения параметров для построения графа, содержащего все варианты ассетов на разных этапах развития. Исходя из наблюдений, на протяжении первых трех лет развития ели в оптимальных условиях питомника параметры принимают следующие значения: почва – 1, освещенность – 1, влажность – 1. Затем учтена пересадка ели в открытый грунт на четвертом году развития в подготовленную почву с достаточной влажностью и оптимальной освещенностью ввиду отсутствия конкуренции за свет, соответственно: почва – 2, освещенность – 1, влажность – 2. Также наблюдались небольшие отклонения освещенности и влажности вследствие конкуренции, возникающей в централизованных посадках, из-за чего возникает вариативность параметров. После наступления возраста смыкания крон на 10–12-м году развития используем значения параметров: почва – 2, освещенность – 2 и влажность – 2. Развитие дерева в течение 20–40 лет было объединено в один этап, так как ель в данном возрасте мало подвержена незначительным переменам во влажности и освещенности, общие темпы роста ускоряются. Средний уровень освещенности снижается, если ель высажена в густом древостое, в основном наблюдается снижение влажности почвы вследствие высокой межвидовой конкуренции, что и отражено преимущественным наблюдением 3-го класса влажности, 2-го класса почвы и 2-го класса освещенности. Также возникает вариативность параметров из-за особенностей

отдельных посадок и конкуренции. В более густозалесянных посадках растения низшего порядка принимают на себя большой объем влаги, значительно осушая почву, что и отражено наблюдениями 3-го класса влажности.

Итоговый выбор результирующего ассета в зависимости от заданных условий произрастания происходит по таблице параметров, в которой по годам заданы степени выраженности каждого фактора. Алгоритм выбора ассета 5-летнего возраста при соблюдении заданных таблицей параметров и соблюдении вышесказанных условий отражен частично и представлен на графе (рис. 3). Для упрощения интерпретации классы параметров на рисунке обозначены разными цветами.

Каждый узел графа на рис. 3 представляет собой готовый ассет, построенный по алгоритмам роста с учетом заданных условий. На каждом этапе развития совершается переход на уровень ниже к следующему узлу между наблюдаемыми условиями для достижения наиболее точного и реалистичного результата. Пользователь, при введении изменений на каком-либо этапе изменяет исходный обход и переходит к ветви графа со скорректированными им параметрами. На графе обход до 40-го года в соответствии с таблицей обозначен черной линией. Однако при изменении пользователем параметров четвертого года (во время пересадки саженца в грунт) с 2-1-2 на 2-1-3 (грунт с недостаточной влажностью) обход к результирующему ассету будет совершаться по пути, обозначенному двойной линией. Таким образом, пользователь через таблицу влияет на итоговый получаемый ассет.

Каждый ассет уникален, поскольку выращен с соблюдением заданных на каждом уровне условий. В самом простом случае готовые ассеты разработаны предварительно и помещены в коллекцию.

Количество вариаций на каждом уровне обусловлено количеством вариантов изменения наблюдаемых параметров. Бонитет почвы при пересадке в грунт изменяется однозначно, не увеличивая количества комбинаций параметров. Согласно исследованиям, освещенность начинает кардинально влиять только после смыкания крон, которое происходит на 10–13-м году, в зависимости от посадки, либо влияет изначально для самосеющихся елей в густых посадках. В рассматриваемом ассете не наблюдались предельные периоды засухи, которые также не дали увеличения комбинаций признаков, приводящих к избыточности модели. В таблице приведены только обобщенные значения параметров на те периоды роста дерева, когда происходит их существенное изменение,

хотя в целом их значения могут меняться ежегодно, и это можно учесть в расширенной таблице параметров.

В программном отношении переход к следующему уровню отражается в виде наращивания переменной пути с дописыванием в значение переменной параметров каждого уровня и получением на выходе уникального ассета, содержащего в самом названии описание условий произрастания, наблюдаемых на каждом этапе. Результатом подобных обходов графа и учета параметров являются два уникальных дерева в возрасте 40 лет, представленные на рис. 4, – результат обхода по пути, соответствующему таблице слева и результат обхода по измененному пути – справа. На рис. 4 показано, как неоптимальные параметры повлияли на рост и развитие дерева. Крона не смогла раскрыться до максимальных значений, общая высота в сравнении с оптимальной ниже.

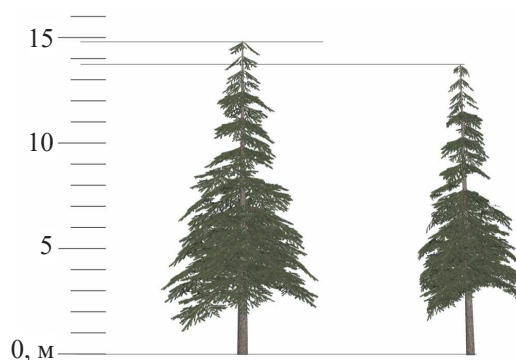


Рис. 4. Дерево в возрасте 40 лет по оптимальному (слева) и выборочному (справа) обходам

Данные ассеты формируются на основе модификации и преобразования дополнения для программы трехмерной визуализации Blender 3.0 Sapling Tree Generator путем введения в нее формул и законов роста дерева с учетом изменяющихся параметров и многолетних наблюдений различных ученых и экологов [5–7]. Unity поддерживает в проекте папки ресурсов Resources, для загрузки в сборку контента по надобности. В Unity Pro, Unity iOS Advanced и Unity Android Advanced также можно создавать ассет-бандлы (Asset Bundle) – файлы, полностью отделенные от главной сцены и содержащие ассеты, к которым можно получить доступ при необходимости из внешнего файла или по URL.

Для загрузки ассет-бандла используется запрос, который создается с помощью метода UnityWebRequestAssetBundle.GetAssetBundle.

Вся процедура описана в созданном классе ExportAssetBundles, полный код которого приведен в листинге.

```
public class ExportAssetBundles {
[MenuItem("Assets/Build AssetBundle")]
static void ExportResource () {
string path = "Assets/myAssetBundle.unity3d";
Object[] selection =
Selection.GetFiltered(typeof(Object),
SelectionMode.DeepAssets);
BuildPipeline.BuildAssetBundle(Selection.activeObject,
selection, path,
BuildAssetBundleOptions.CollectDependencies
|BuildAssetBundleOptions.CompleteAssets);
}}
```

Подключение коллекции

Для получения данных в нужном для Unity виде используется `DownloadHandlerAssetBundle`. Чтобы применить данный скрипт, требуется создать C# скрипт с именем `ExportAssetBundles.cs`, внутри папки `Editor`, в окне `Project View`, затем выбрать ассеты из подготовленной коллекции, команду `BUILD` в ассет-меню и сохранить полученный бандл. Первая строка функции `ExportResource` указывает на путь к `AssetBundle`. Следующая строка устанавливает выделение на `AssetBundle` в окне `Project`. Функция `BuildAssetBundle` – это строка, которая создает `AssetBundle` и сохраняет его в указанном месте. Первый параметр указывает на корневой ассет, являющийся специальным `Asset`, который можно получить непосредственно с помощью свойства `mainAsset` при загрузке `Assets` из `AssetBundle`. Вторым параметром – это массив объектов, которые составят `AssetBundle`. Третий параметр – это место на диске, в котором будет сохранен `AssetBundle`. Последними параметрами являются флаги сборки или параметры, используемые при сборке `AssetBundles`. Эти `BuildAssetBundleOptions` можно комбинировать с помощью побитового оператора `ИЛИ`.

Чтобы собрать ассет-бандл, вызывается метод `BuildPipeline.BuildAssetBundle()`. В аргументах метода указывается массив объектов для включения в бандл и некоторые другие опции. Этот метод собирает файл, который потом можно динамически загружать в реальном времени с помощью `AssetBundle.Load()`.

Коллекция динамического ассета впоследствии может быть настроена таким образом, чтобы формировать итоговый ассет исходя из заданных изначально параметров. Задание параметров происходит через таблицу значений. В процессе роста дерева существует возможность на каждом этапе роста дерева скорректировать его параметры.

Загружая такие коллекции в готовые системы прогнозирования или моделирования местности, можно добиться более точного и реалистичного результата при визуализации местности даже с течением времени. Более точная визуализация помогает наиболее достоверно охватить объем информации и провести своевременный ситуационный анализ, будь то планирование территории различного назначения или анализ лесного массива, для своевременного выявления ошибок посадки и ухода за деревьями и насаждениями.

Заключение. Таким образом, динамический ассет предоставляет возможность визуализации роста дерева с учетом разных условий произрастания, что можно использовать в различных системах прогнозирования развития лесных массивов. Визуализация в данном случае важна для более полного и детального анализа хода роста дерева с учетом среды произрастания и последствий воздействия на него внешних условий, в том числе и в результате возникновения чрезвычайных ситуаций.

Список литературы

1. Темпы роста ели: справочник. URL: <https://www.landscape.ru/plant/picea/abies/> (дата обращения: 21.12.2021).
2. Матюхин Д. Л. Системы элементарных монометрических побегов у хвойных // Известия ТСХА. 2012. Вып. 1. С. 142–152.
3. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. The Algorithmic Beauty of Plants. USA: Springer-Verlag, 1990. 260 с.
4. Asset Bundle. Unity Documentation. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/AssetBundlesIntro.html> (дата обращения: 21.12.2021).
5. Гавриков В. Л. Моделирование роста деревьев и древостоев в контексте углеродного цикла. URL: <https://s-vfu.ru/upload/iblock/2da/2da6a025837368e80af3ca8435c2136f.pdf> (дата обращения: 05.02.2022).
6. Определение прироста у растущих деревьев. URL: <https://studopedia.info/3-63703.html> (дата обращения: 05.02.2022).
7. Кофман Г. Б. Рост и форма деревьев. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/kofm/text.pdf> (дата обращения: 05.02.2022).

References

1. Spruce growth rate. Available at: <https://www.landscape.ru/plant/picea/abies/> (accessed 21.12.2021) (In Russian).
2. Matuhin D. L. Systems of elementary monometric shoots in conifers. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy], 2012, no 1, pp. 142–152 (In Russian).
3. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants*. USA: Springer-Verlag, Publ., 1990. 260 p.
4. Asset Bundle. Unity Documentation. Available at: <https://docs.unity3d.com/Manual/AssetBundlesIntro.html> (accessed 21.12.2021).
5. Gavrikov V. L. Tree growth modelling according to carbon cycle. Available at: <https://s-vfu.ru/upload/iblock/2da/2da6a025837368e80af3ca8435c2136f.pdf> (accessed 05.02.2022) (In Russian).
6. Evaluation of the growing trees growth. Available at: <https://studopedia.info/3-63703.html> (accessed 05.02.2022) (In Russian).
7. Kofman G. B. Growth and form of trees. Available at: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/kofm/text.pdf> (accessed 05.02.2022).

Информация об авторах

Бируля Анастасия Сергеевна – магистрант кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: birulia_a@belstu.by

Гурин Николай Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ngourine@mail.ru

Information about the authors

Birulia Anastasiya Sergeevna – Master's degree student, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: birulia_a@belstu.by

Gurin Nikolay Ivanovich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ngourine@mail.ru

Поступила после доработки 13.05.2022