

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 519.676: [581.442+58.02] (571.122)

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ МОРФОГЕНЕЗА ПОБЕГОВ ДЕРЕВЬЕВ НА ПРИМЕРЕ МОЛОДНЯКОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОГО ФАКЕЛА

А. А. Монтиле¹, И. А. Юсупов¹, А. И. Монтиле², С. А. Шавнин¹

¹ Ботанический сад УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

² Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

E-mail: org17@mail.ru, usiaz@mail.ru, amontile@gmail.com, sash@botgard.uran.ru

Поступила в редакцию 07.07.2017 г.

Исследовали взаимосвязи роста боковых побегов и хвои в молодняках сосны с использованием методического подхода к математико-статистической обработке биометрических данных, который дополняет современные методы анализа. Подход позволяет выявлять как линейные, так и нелинейные взаимосвязи измеряемых признаков, набор которых облегчает формирование собственных концептуальных моделей или верификацию известных и помогает выявлению морфометрических показателей, существенных для моделирования изучаемых процессов. Установлено наличие следующих связей: обратной зависимости длины хвои от ее густоты (количества хвойных пар на единицу площади поверхности ауксибласта); зависимости длины ауксибласта от «развитости» охвоения (произведения количества хвойных пар на длину хвои); зависимости количества хвойных пар на побеге и длины побега текущего года от величины осевого прироста предыдущего года; взаимосвязи «развитости» охвоения с соотношением осевых и радиальных размеров побега. Положительная корреляция между удаленностью от факела и величиной коэффициентов в формуле, конкретизирующей последнюю взаимосвязь, позволяет предположить влияние повышения температуры на относительное перераспределение радиального и осевого приростов биомассы ауксибласта. Анализ полученных формульных соотношений свидетельствует о существенной связи радиального и осевого ростовых процессов с охвоением, а также об их сопряженности с состоянием в предыдущий год и влиянии на них газового факела.

Ключевые слова: анализ биометрических данных, моделирование роста растений, сосна обыкновенная, морфогенез побега, влияние факторов среды на рост.

DOI: 10.15372/SJFS20180301

ВВЕДЕНИЕ

Важными задачами изучения морфогенеза являются разработка математических моделей и описание общих закономерностей, в соответствии с которыми реализуются процессы индивидуального роста всех представителей выбранной для исследований на теоретическом уровне группы биологических объектов. Построение модели, все переменные которой непосредствен-

но измеримы, т. е. совпадают с биометрическими данными полевых исследований, облегчает интерпретацию и верификацию результатов ее формального анализа.

Использование аппарата математической статистики для обработки биометрических данных позволяет обнаружить связь между изменениями показателей или факторов, вид которой конкретизируется регрессионными соотношениями, характеризующими отдельные зависи-

мости, представляющие интерес с точки зрения исследователя. Получаемые формульные соотношения могут служить основой важного содержательного анализа, однако результаты исследований оказываются *фрагментированными* как по уровням рассмотрения объекта, так и по совокупностям учитываемых показателей. Даже будучи сведены вместе, они, как правило, не образуют математическую модель, которая может быть исследована аналитическими или численными методами и использована вне рамок конкретного экспериментального материала, что имеет место при концептуальном моделировании.

Как с теоретической, так и с практической точки зрения интерес представляет построение модели роста растения на уровне организма (Биоразнообразие..., 2006; Системная компьютерная биология, 2008; Галицкий, 2010, 2012; Galitskii, 2013; Гавриков, 2016), которая позволит разделить, выявить и конкретизировать взаимную обусловленность влияния внешних (климатических и антропогенных) и внутренних (наследственных) факторов на ростовые процессы, изучавшегося многими исследователями (Pietarinen et al., 1982; Kozłowski, Pallardy, 1997; Забуга, Забуга, 2006; Pallardy, 2008; Fries, 2012; Almeida et al., 2015). Возможность построения такой модели на основе морфометрических показателей базируется на взаимосвязанности и согласованности процессов развития для каждого уровня структурно-функциональной организации биологической системы и между ними.

Предлагаемая методика разработана в рамках развиваемого авторами подхода к обработке данных наблюдений за биологическими объектами и предназначена для получения как можно большего количества достоверных недублирующихся формульных зависимостей, связывающих значения признаков, определяемых в результате

конкретного полевого исследования. Набор формульных зависимостей облегчает формирование собственных концептуальных моделей или верификацию известных и помогает выявлению морфометрических признаков, существенных для моделирования интересующих исследователя процессов.

Цель работы – получение на основе новой методики математической модели взаимосвязи характеристик приростов и ассимиляционного аппарата ветвей сосны обыкновенной и исследование зависимости ее параметров от расстояния до факела. В качестве экспериментальных данных в работе использовали результаты измерений морфометрических характеристик молодых сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., расположенных в зоне теплового влияния факела по сжиганию попутного газа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На территории Покачевского участкового лесничества Мегионского лесничества Ханты-Мансийского автономного округа – Югры по стандартной методике заложена постоянная пробная площадь (ППП) в сосновых молодняках. Насаждение на участке вырубленного во время строительства газового факела спелого сосняка лишайникового имеет естественное происхождение. На ППП выделено 7 секций шириной 10 м, которые располагаются вдоль радиального направления к факелу и перпендикулярно направлению доминирующих ветров (Shavnin et al., 2009). Таксационные характеристики древостоя приведены в табл. 1.

Факел для сжигания попутного нефтяного газа, создающий вокруг себя тепловое поле (Bjørge, Bratseth, 1996; Shore, 1996; Schwartz, White, 1997; Деградация..., 2001), находится на расстоянии 70 м от границы I секции. Следует

Таблица 1. Таксационные характеристики древостоя на ППП

Номер секции	Класс бонитета	Возраст, лет	Средние		Полнота		Запас, м ³ /га	Густота, шт./га
			высота, м	диаметр, см	абсолютная, м ² /га	относительная		
I	III	11	2.6	4.1	6.774	0.50	7.2	5160
II	III	12	2.9	4.3	9.390	0.97	10.2	6420
III	III	12	2.7	4.2	6.063	1.42	6.2	4380
IV	III	12	2.6	4.7	4.965	1.72	5.2	2900
V	III	12	2.4	4.2	4.717	1.70	4.8	3470
VI	III	12	2.6	3.6	5.154	1.63	5.3	5080
VII	II	13	3.2	4.4	7.574	1.32	9.1	5020

отметить, что между I и VII секциями градиент температуры воздуха на высоте 1.3 м составляет 1.0–1.5 °С, а почвы – 5–6 °С. Данные значения характерны для общей конфигурации теплового поля. Измерение температуры в конкретное время датчиками (в отдельных точках) позволяет установить параметры поля. При этом в связи с мозаичностью микрорельефа и неоднородностью растительности в пределах секции температура на разных участках неодинакова и постоянно изменяется в течение суток и всего вегетационного периода. Все это не позволяет при оценке фактора использовать значения, получаемые усреднением по времени и/или площади измерений температурных датчиков. Вместе с тем тенденция к увеличению температуры с приближением к факелу достоверна, поэтому влияние теплового поля изучали с помощью закладки секций, расположенных на различном расстоянии от него. В период проведения исследований возраст древостоя составлял 15 лет, а густота – от 2900 до 6420 шт./га. На секциях выбрали по 10 средних по морфометрическим характеристикам модельных деревьев, у которых в средней части кроны отобрали типичную ветку, растущую на западной стороне, обращенной к факелу. У каждой ветки определяли следующие характеристики: длину (L) и диаметр (D) 1–2-летних ауксибластов (общее количество 140, длина 2-летних ауксибластов обозначена $L_{\text{пред}}$); количество хвойных пар на них (N) и их длину (l). Последние выбирали случайным образом из числа неповрежденных (15 шт. на побеге). Измерения проводили штангенциркулем с точностью $\pm 0.5 \times 10^{-3}$ м.

Нами использован подход, связанный с построением «двухуровневой» модели и предполагающий выявление связывающих морфометрические показатели формульных зависимостей, которые имеют одинаковый вид для всех изучаемых объектов, но отличаются значениями коэффициентов в выделяемых по различным основаниям группах. Вариабельность последних предполагается обусловленной различными факторами (при этом группы выделяются в соответствии со схожестью условно-переменных (климат, загрязнение), условно-постоянных (почва) и постоянных (наследственность) показателей) и конкретизируется в формульном виде на втором этапе исследований.

В качестве средств реализации стандартных методик статистической обработки данных использовали пакеты StatGraphics Centurion XV v 15, Statistica v 8.0, а также Excel. Кроме того,

применяли разработанный авторами специализированный пакет «Классан» (Свидетельство..., 2017).

В результате применения стандартных методик статистической обработки данных об осевых и радиальных приростах ствола ранее выявлены их зависимость от расстояния до факела и изменение характера зависимости с возрастом деревьев (Shavnin et al., 2009). Однако при обработке результатов измерения морфометрических характеристик ветвей на базе этих же методик достоверных связей между величиной осевых приростов побегов и температурным градиентом не обнаружено, хотя ранее установлено, что вблизи факела увеличиваются толщина и плотность хвои, а также изменяется комплекс физиолого-биохимических показателей, что свидетельствует о ксероморфизации ассимиляционного аппарата в связи с тепловым воздействием. Возникла необходимость применения нового подхода для получения модели взаимосвязи морфометрических характеристик ветви, совместно учитывающей прироста ветки и характеристики хвои и конкретизирующей зависимость от температуры среды (расстояния до факела).

Применялись алгоритмическая модель пополнения набора признаков за счет «вычисляемых» переменных и один из способов их использования. Рассмотрим подробнее реализуемую последовательность действий.

1. *Пополнение набора признаков переменными, значения которых не были непосредственно измерены.* Значения «новых» переменных вычисляются по формулам, которые автоматически генерируются на основе стандартного набора арифметических операций и алгебраических функций или вводятся исследователем. Таким образом, каждой «вычисляемой» переменной соответствует формула, в общем случае нелинейная, определяемая индивидуальной комбинацией старых и ранее полученных «новых» переменных. Кроме того, «вычисляемые» переменные могут определяться как разность значений признака в конкретные моменты времени и значения признаков в другие моменты времени (развертка куба «объекты–признаки–время измерения» в таблицу «объекты–признаки» по одному из временных сечений). В разработанном пакете реализована послойная (слой определяется количеством включаемых переменных и используемых операций) процедура генерации формул. В отличие от метода группового учета аргументов (Ивахненко и др., 1976) отсутствует отсеивание комбинаций переменных на промежуточ-

ных слоях по какому-либо критерию. Оценке подвергаются только итоговые соотношения, при этом используются стандартные критерии, с помощью которых производится сокращение выдаваемого пользователю перечня, а не выбор наилучшей формулы.

2. *Поиск линейных связей между парами из всего набора переменных.* Поиск производится автоматически посредством построения корреляционной матрицы на расширенном наборе переменных и выделением пар переменных с высокой (порог задается пользователем) степенью парной корреляции. Наличие больших коэффициентов парной корреляции между «вычисляемыми» переменными, для получения значения которых использовались нелинейные формулы, обеспечивает автоматическое выявление *некоторых* нелинейных функциональных зависимостей.

3. *Поиск не выявленных на предыдущем шаге нелинейных связей между всеми переменными* реализуется пользователем в автоматизированном режиме, в частности посредством визуального анализа, который, если переменных не больше трех, как правило, удобнее на практике по сравнению с подтверждением наличия нелинейной зависимости путем анализа корреляционных отношений.

4. Если две переменные, между которыми зафиксирована связь, являются исходными, то проводится традиционная обработка – либо восстановление линейной регрессии и подтверждение ее линейного характера, либо нелинейная аппроксимация частного или общего вида.

5. Если одна из переменных «новая», то осуществляется подстановка вместо нее формулы для вычисления.

В результате выполнения пунктов 4 и 5 выявляются связи вида

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

5. Если две переменные «новые», то формулы, использованные для их вычисления, подставляются вместо обеих. Таким образом, выявляется связь вида

$$\varphi(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}) = f(x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_k}), \\ i_0 \in I, j_0 \in J, I \cap J = \emptyset,$$

что невозможно при использовании стандартных методов.

Таким образом, получается набор формул, которые могут рассматриваться в качестве кан-

дидатов на включение в математическую модель, «опирающуюся» на непосредственно измеряемые величины.

С исторической точки зрения приведенный фрагмент разрабатываемой методики является развитием подхода, предложенного М. М. Бонгардом (1967), вышеупомянутого метода группового учета аргументов (Ивахненко и др., 1976), метода полиномиального преобразования пространства признаков (Ту, Гонсалес, 1978), метода построения потенциальных функций (Браверман, Мучник, 1983). Существенными отличиями предлагаемого метода от указанных являются ориентация на получение набора формул, а не единственной наилучшей и отсутствие принципиальных ограничений на перечень используемых операций и алгебраических функций.

При обработке данных о побегах набор непосредственно измеренных признаков дополнен «вычисляемыми» переменными со следующим ограничением: в вычислениях участвовали до трех переменных и использовалось не более четырех операций (сложения/вычитания, умножения/деления, возведения в квадрат и куб), а также одной стандартной алгебраической функции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлено 16 зависимостей с коэффициентами парной корреляции выше 0.6 ($p < 0.05$), из них отобраны те, для которых коэффициенты корреляции улучшаются или, по крайней мере, минимально ухудшаются при сужении выборки (при обработке данных по отдельной секции). Необходимо отметить, что такой подход противоречит основной идее верификации эмпирически выявляемых зависимостей, связанной с устойчивостью результатов при увеличении выборки (Загоруйко, 1999). Основанием такого отбора в нашем случае являлось предположение о возможном влиянии неучтенных характеристик местности, вариабельность которых уменьшается при сокращении площади участка. Фрагмент корреляционной матрицы для отобранных переменных приведен в табл. 2, а для ППП и отдельных секций – в табл. 3.

Следует отметить, что как полученные, так и отобранные для включения в модель соотношения допускают содержательную интерпретацию. Рассмотрим отобранные зависимости подробнее (в формулах символами $k_1 - k_{10}$ обозначены константы).

Таблица 2. Выборка из корреляционной матрицы для переменных, входящих в соотношения, используемые в анализе данных

Соотношение	<i>N</i>	<i>L</i>	$N/(L \cdot D)$	<i>l</i>	<i>N</i> · <i>l</i>	$\ln(N \cdot l)$	<i>L</i> _{пред}
<i>L</i>	0.868	1	–	–	–	–	–
$N/(L \cdot D)$		–	1	–	–	–	–
<i>l</i>	0.464	0.620	–0.611	1	–	–	–
<i>N</i> · <i>l</i>		0.890	–	–	1	–	–
$\ln(N \cdot l)$		0.781	–	–	–	1	–
<i>L</i> _{пред}	0.891	0.893	–0.622	0.531	0.875	0.633	1
<i>L/D</i>	0.657	–	–0.501	0.505	0.657	0.739	0.675

Примечание. Полужирным шрифтом отмечены значения пяти анализируемых соотношений.

Таблица 3. Выборка коэффициентов корреляции для отобранных соотношений применительно к отдельным секциям и их совокупности

Соотношение	Совокупность	Секция						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
$l = k_1 \cdot N/(L \cdot D) + k_2$	–0.61	–0.64	–0.72	–0.65	–0.67	–0.68	–0.36	–0.40
$L = k_3 \cdot N \cdot l + k_4$	0.89	0.88	0.93	0.84	0.90	0.93	0.94	0.93
$N = k_5 \cdot L_{пред} + k_6$	0.89	0.92	0.96	0.70	0.92	0.91	0.95	0.90
$L = k_7 \cdot L_{пред} + k_8$	0.89	0.91	0.94	0.96	0.80	0.90	0.97	0.96
$L/D = k_9 \cdot \ln(N \cdot l) + k_{10}$	0.74	0.78	0.77	0.51	0.74	0.95	0.91	0.63

Примечание. Соотношения линейны относительно «вычисляемых переменных» $N/(L \cdot D)$, $N \cdot l$, L/D , $\ln(N \cdot l)$.

$$l = k_1 \cdot N/(L \cdot D) + k_2, k_1 < 0$$

или в числовом виде:

$$l = -0.3287 \cdot N/(L \cdot D) + 4.3449; \quad (1)$$

$$R^2 = 0.3731.$$

Из полученного уравнения (1) следует, что длина хвои находится в обратной зависимости от густоты охвоения, определяемой как количество хвойных пар на единицу поверхности ауксибласта. Таким образом, размеры хвои, количество пар которой закладывается в ростовой почке в предыдущий год, зависят от прироста ауксибласта в текущем году, а более точно – от величины поверхности побега текущего года.

$$L = k_3 \cdot N \cdot l + k_4 \text{ или в числовом виде:} \quad (2)$$

$$L = 0.0214 \cdot N \cdot l + 3.0016; R^2 = 0.7922.$$

Уравнение (2) показывает, что длина ауксибласта прямо пропорциональна «развитости» охвоения. Мерой «развитости» в данном случае является произведение количества хвойных пар на длину хвоинки. Отметим, что более адекватной характеристикой представляется поверхностная либо объемная величина для хвои. Проверка данного предположения является предметом дальнейших исследований.

Аналогичные, но менее значимые зависимости выявлены для диаметра и объема (вычисляемая величина) ауксибластов. Уравнение связи для зависимости диаметра имеет коэффициент детерминации 0.54, а для объема – 0.70, и его величина выше для выборок по отдельным секциям.

$$N = k_5 \cdot L_{пред} + k_6; \quad (3)$$

$$N = 6.6136 \cdot L_{пред} + 7.9639; R^2 = 0.7930.$$

Согласно уравнению (3), количество пар хвои на побеге данного года определяется длиной побега (величиной прироста) предыдущего года. Это указывает на важную особенность морфогенеза ветви – существенную связь между количеством брахибластов и длиной ауксибласта предшествующего года.

$$L = k_7 \cdot L_{пред} + k_8; \quad (4)$$

$$L = 0.6948 \cdot L_{пред} - 0.1267; R^2 = 0.7975.$$

Из уравнения (4) следует, что длина годового побега прямо пропорциональна величине прироста за предшествующий год. Аналогичные результаты приведены в работе В. Ф. Уилсона (1989), в которой установлена высокая степень корреляции приростов ветвей дугласии

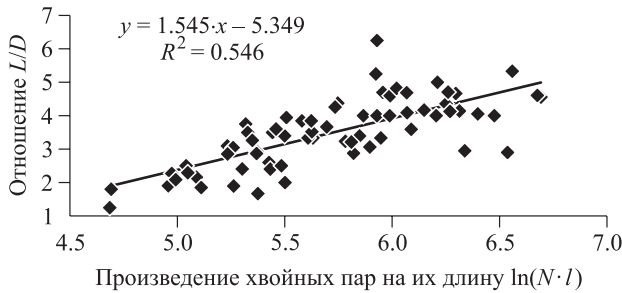


Рис. 1. Зависимость отношения длины осевого прироста ауксибласта к диаметру от «развитости» охвоения.

Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco за предшествующий и текущий годы. Также обнаружена связь интенсивности роста побегов сосны скрученной широкохвойной *Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats с температурой воздуха последних двух смежных лет (Kilpatrick, Seaby, 1991).

$$L/D = k_9 \cdot \ln(N \cdot l) + k_{10};$$

$$L/D = 1.5453 \cdot \ln(N \cdot l) - 5.3994; \quad (5)$$

$$R^2 = 0.5465.$$

Уравнение (5) свидетельствует о том, что развитость охвоения зависит не только от его густоты (уравнение (1)) и прироста побега за предшествующий год (уравнение (3)), но и взаимосвязана с соотношением линейных и радиальных размеров сформированного в течение года ауксибласта (рис. 1).

Соотношение (5) представляет самостоятельный интерес, так как одна из целей исследований – определение влияния удаленности от факела на ростовые процессы. Выявлено, что внешние условия влияют на коэффициенты в полученных зависимостях. В частности, обнаружена положительная корреляция (коэффициент корреляции 0.737, $p < 0.05$) между значениями коэффициента k_9 и удаленностью от факела (рис. 2).

Последнее позволяет высказать предположение: чем выше температура, тем больше прирост диаметра бокового побега относительно длины при условии неизменности развитости охвоения. Незначительная связь обнаружена и для коэффициентов k_1 (коэффициент корреляции 0.581; $p < 0.05$) и k_3 (коэффициент корреляции 0.584; $p < 0.05$) из соотношений (1) и (2) соответственно.

Подтверждаемый анализом остатков линейный характер зависимости длины верхушечного сегмента ветки от прироста за предыдущий год с высокими значениями коэффициентов парной корреляции (см. табл. 3) по различным выбор-

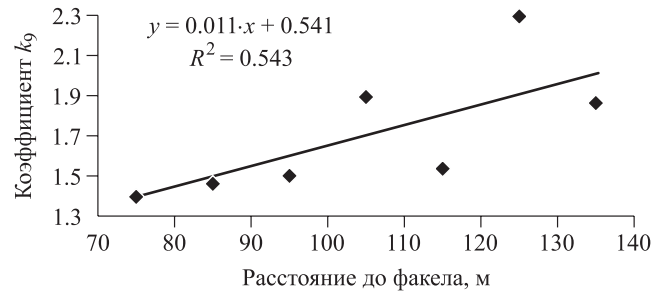


Рис. 2. Зависимость коэффициента k_9 в соотношении $L/D = k_9 \cdot \ln(N \cdot l) + k_{10}$ от расстояния до факела.

кам, с одной стороны, и объяснение такой обусловленности на модельном уровне (соотношения (1–3)) – с другой, позволяют сделать вывод о существенной связи линейного прироста ветвей с климатическими показателями как данного, так и предыдущего годов. Другими словами, при описании, моделировании или объяснении осевых приростов ветвей необходимо совместно учитывать морфологические характеристики ауксибластов двух смежных лет, что подтверждает предположение об обеспечении осевого роста запасными фондами ассимилятов, создаваемыми осенью прошлого года и используемыми для роста побега в текущем году (Забуга В. Ф., Забуга Г. А., 2006).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предлагаемая методика пополнения обрабатываемого набора признаков за счет «вычисляемых» переменных обеспечивает высокую степень автоматизации выявления зависимостей между изучаемыми показателями при обработке значительных объемов данных.

2. Выявлены зависимости, которые могут рассматриваться как компоненты математической модели роста ветки, характеризующие взаимосвязи морфометрических показателей хвои и приростов побегов сосны обыкновенной. Модель включает в свой состав параметры, значения которых определяются различными факторами, влияющими на процессы роста.

3. Получены формальные соотношения, конкретизирующие ряд известных на содержательном уровне особенностей морфогенеза ветвей сосны, и выявлен ряд новых. Наиболее важные из них: длина хвои обратно пропорциональна ее густоте; длина ауксибласта прямо пропорциональна предложенному в работе показателю «развитости» охвоения; радиальные и осевые приросты взаимосвязаны с «развитостью» охвоения.

4. Сделано предположение о влиянии температуры на относительное перераспределение радиального и осевого приростов биомассы ауксипласта.

5. Выявлена необходимость учета условий (в частности климатических) за два смежных года для корректного формального описания и объяснения процессов роста ветвей сосны.

Авторы выражают благодарность начальнику отдела экологического нормирования ЗАО «СибНИПИРП» И. Л. Москвиной за неоценимую помощь при сборе материалов для публикации. Авторы признательны рецензенту, чьи подробные и конструктивные замечания позволили существенно улучшить статью.

Работа выполнена при поддержке Комплексной программы Уральского отделения РАН (проект № 18-4-4-10).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование / Отв. ред. В. К. Шумный, Ю. И. Шокин, Н. А. Колчанов, А. М. Федотов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 648 с.
- Бонгард М. М. Проблема узнавания. М.: Наука, 1967. 320 с.
- Браверман Э. М., Мучник И. Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. М.: Наука, 1983. 464 с.
- Гавриков В. Л. Моделирование роста деревьев и древостоев в контексте углеродного цикла: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08. Якутск, 2016. 39 с.
- Галицкий В. В. Секционная структура дерева. Модельный анализ вертикального распределения биомассы // Журн. общ. биол. 2010. Т. 71. № 1. С. 19–29.
- Галицкий В. В. Динамика биомассы ветвей высших порядков дерева. Модельный анализ // Журн. общ. биол. 2012. Т. 73. № 6. С. 442–452.
- Деградация и демутация лесных экосистем в условиях нефтедобычи / С. В. Залесов, Н. А. Кряжевских, Н. Я. Крупинин, К. В. Крючков, К. И. Лопатин, Н. А. Луганский, В. Н. Луганский, А. Е. Морозов, И. В. Ставищенко, И. А. Юсупов. Вып. 1. Екатеринбург, 2001. 436 с.
- Забуга В. Ф., Забуга Г. А. Влияние факторов внешней среды на рост ствола сосны обыкновенной в лесостепном Предбайкалье // Хвойные бореальной зоны. 2006. Т. XXIII. № 3. С. 86–95.
- Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. 270 с.
- Ивахненко А. Г., Зайченко Ю. П., Димитров В. Д. Принятие решений на основе самоорганизации. М.: Советское радио, 1976. 280 с.
- Свидетельство 2017610856. Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа решения задачи классификации на основе анализа наборов кластерных конфигураций и средств визуальной обработки данных / А. А. Монтиле, А. И. Монтиле, С. А. Шавнин; заявитель и правообладатель ФГБУН Ботанический сад УрО РАН (RU). Заявка № 2016662912; заявл. 23.11.2016; опубл. 18.01.2017. Реестр программ для ЭВМ.
- Системная компьютерная биология / Отв. ред. Н. А. Колчанов, С. С. Гончаров, В. А. Лихошвай, В. А. Иванисенко. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 769 с.
- Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 412 с.
- Almeida M., Graner E. M., Brondani G. E., Oliveira L. S., Artioli F. A. et al. Plant morphogenesis: theoretical bases // Adv. For. Sci. 2015. V. 2. N. 1. P. 13–22.
- Bjørge T., Bratseth A. Measurement of radiation heat flux from large scale flares // J. of Hazardous Materials. 1996. N. 46. P. 159–168.
- Fries A. Genetic parameters, genetic gain and correlated responses in growth, fibre dimensions and wood density in a Scots pine breeding population // Ann. For. Sci. 2012. V. 69. P. 783–794.
- Galitskii V. V. Biomass dynamics of higher-order tree branches: An analysis of the model // Biol. Bull. Rev. 2013. V. 3. Iss. 5. P. 412–421.
- Kilpatrick D. J., Seaby D. A. Climate and leader length variation // Irish Forestry. 1991. V. 48. N. 1–2. P. 32–45.
- Kozlowski T. T., Pallardy St. G. Growth control in woody plants. San Diego, California: Academic Press, 1997. 642 p.
- Pallardy St. G. Physiology of woody plants. 3-rd Ed. San Diego, California: Academic Press, 2008. 454 p.
- Pietarinen I., Kanninen M., Hari P., Kellomaki S. A simulation model for daily growth of shoots, needles, and stem diameter in Scots pine trees (*Pinus sylvestris*) // For. Sci. 1982. V. 28. P. 573–581.
- Schwartz R. E., White J. M. Predict radiation from flares // Chemical Engineering Progress. 1997. V. 93. N. 7. P. 42–45.
- Shavnin S. A., Yusupov I. A., Montile A. A., Golikov D. Yu., Montile A. I. Effect of increased ambient temperature on the growth rate of young pine forests in the impact zone of a petroleum gas flare // Rus. J. Ecol. 2009. V. 40. Iss. 1. P. 1–5 (Original Russian Text © S. A. Shavnin, I. A. Yusupov, A. A. Montile, D. Yu. Golikov, A. I. Montile, 2009, publ. in Ekologiya, 2009, N. 1. P. 3–8).
- Shore D. Making the flare safe // J. Loss Prev. Process Ind. 1996. V. 9. N. 6. P. 363–381.
- Wilson B. F. Shoot production in Douglas-fir branches // Can. J. For. Res. 1989. V. 19. N. 6. P. 802–805.

METHODICAL APPROACH TO THE STUDY OF TREE SHOOTS MORPHOGENESIS ON EXAMPLE OF YOUNG SCOTCH PINE TREE STANDS, GROWING IN THE GAS FLAME IMPACT ZONE

A. A. Montile¹, I. A. Yusupov¹, A. I. Montile², S. A. Shavnin¹

¹ *Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
8 Marta St., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation*

² *Ural State Forest Engineering University
Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation*

E-mail: org17@mail.ru, usiaz@mail.ru, amontile@gmail.com, sash@botgard.uran.ru

The subject of the study is the relationship between growth of lateral shoots and pine needles. A methodical approach to the mathematical-statistical processing of biometric data is used, which supplements modern methods of analysis. The approach makes it possible to identify both linear and nonlinear relationships between directly measurable characteristics in the form of formula relations, the set of which facilitates the formation of ones own conceptual models or the verification of known ones and helps identify morphometric characteristics that are essential for modeling the studied processes. The presence of the following relationships is established: the inverse dependence of the length of the needles on its density (the number of needles pairs per unit surface area of the auxiblast); the dependence of the length of the auxiblast on the «development» of needles (the product of the number of needles pairs by the length of the needles); the dependence of the number of needles pairs on the shoot and the length of the current year's shoot from the value of shoot increment of the previous year; the relationship of «development» of needles with the ratio of axial and radial dimensions of the shoot. A positive correlation between the remoteness from the flame and the magnitude of the coefficients in the formula specifying the latter relationship allows one to make supposition on the effect of temperature increase on the relative redistribution of the auxiblast biomass over radial or axial increments. An analysis of the formulas obtained indicates a significant relationship between radial and axial growth processes with «development» of needles, as well as their conjugation with the state in the previous year, and the effect of a gas flame on them.

Keywords: *analysis of biometric data, modeling of plant growth, Scotch pine, shoots morphogenesis, influence of environmental factors on growth of woody plants.*

How to cite: *Montile A. A., Yusupov I. A., Montile A. I., Shavnin S. A. Methodical approach to the study of tree shoots morphogenesis on example of young Scotch pine tree stands, growing in the gas flame impact zone // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2018. N. 3: 3–10 (in Russian with English abstract).*