УДК 630*52:630*174.754

ЗАВИСИМОСТЬ ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА СТВОЛА ОТ ТАКСАЦИОННЫХ И БИОПРОДУКЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕРЕВЬЕВ В СОСНЯКАХ ТУРГАЙСКОГО ПРОГИБА

В. А. Усольцев^{1,2}

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

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

E-mail: Usoltsev50@mail.ru

Поступила в редакцию 17.07.2024 г.

Развитие экологии предполагает возможность прогнозирования экологических функций растений на основе их функциональных признаков, в частности удельной площади листьев как отношения площади поверхности листьев к их сухой массе (SLA) и поверхностной плотности листьев (LMA) как величины, обратной SLA. Однако установлено, что на глобальном уровне SLA объясняет только 3.1 % изменчивости прироста деревьев в высоту. Введение и использование интегрального продукционного признака M_p как произведения LMA на площадь горизонтальной проекции кроны показало, что объяснение изменчивости прироста стволов деревьев на уровне 125 видов повысилось до 31 %, но в то же время не выявило его преимуществ в объяснительной способности изменчивости прироста по сравнению с диаметром ствола. Цель настоящего исследования – выяснить, в каком соотношении при моделировании прироста стволов деревьев может состоять объяснительная способность продукционного показателя и совокупности таксационных признаков, таких как диаметр ствола, высота и возраст дерева. Для этого по данным 300 модельных деревьев, взятых на 30 пробных площадях в чистых сосняках Тургайского прогиба, рассчитана последовательность аллометрических моделей в разном сочетании зависимых и независимых переменных. Вследствие слишком высокой трудоемкости определения SLA с достаточной точностью у 300 деревьев в качестве продукционного показателя использовано частное от деления массы хвои на площадь горизонтальной проекции кроны (P_f/S_c). Данный продукционный показатель имеет биологический смысл, несколько отличающийся от M_p , но в информационном отношении не уступает последнему. Установлено, что при расчете многофакторной зависимости прироста площади сечения ствола за последние 10 лет от P_f/S_c и таксационных показателей деревьев, вклад P_f/S_c в объяснение изменчивости прироста составил всего 6 % и был исключен из анализа. В итоге предложена двухфакторная аллометрическая зависимость прироста площади сечения ствола за 10 лет от возраста и диаметра ствола, объясняющая 91 % изменчивости прироста. Предложенная модель дает возможность определять прирост площади сечения древостоя в однообразных сосняках по результатам перечета деревьев по ступеням толщины.

Ключевые слова: функциональные признаки деревьев, таксационные показатели деревьев, прирост деревьев по площади сечения, объяснительная способность, аллометрические модели.

DOI: 10.15372/SJFS20240607

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование экологических функций растений на основе их функциональных признаков имеет важное значение для развития экологии (Shiple et al., 2016; Volaire et al., 2020; Laurans et al., 2024). К функциональным признакам относят морфологические, физио-

логические или фенологические признаки растений, которые прямо или косвенно влияют на их рост, размножение и/или выживание (Violle et al., 2007). Экологический подход, основанный на функциональных признаках, направлен на обобщение и прогнозирование экологических явлений в различных структурных и пространственных масштабах (Klipel et al., 2024). Ис-

пользование функциональных признаков дает возможность масштабирования процессов от уровней дерева или вида до уровня насаждения и лесной экосистемы в целом (Shiple et al., 2016; Chacón-Labela et al., 2023). Функциональные признаки растений, в частности удельная площадь листьев (отношение площади поверхности листьев к их сухой массе, SLA), поверхностная плотность листьев ($LMA = 1 : SLA$) (Уткин и др., 2008), плотность древесины и максимальная высота растения, часто являются показателями скорости роста отдельных деревьев в сообществах (Lebrija-Trejos et al., 2016; Poorter et al., 2019). Особи и виды с высокой SLA и низкой плотностью древесины, как правило, имеют более высокие темпы роста (Paine et al., 2015). Однако проверка влияния функциональных признаков на продуктивность насаждений показала слабую связь главным образом из-за сильной зависимости от местных условий (Paine et al., 2015; Liu et al., 2016; Poorter et al., 2018). Эта проблема обусловлена также сложностью всей истории жизни растений, которую невозможно адекватно описать с помощью одной или двух простых связей (Klipel et al., 2024).

По данным 27.3 тыс. деревьев 278 видов, полученным на всех покрытых лесах континентах, установлено, что SLA объясняет только 3.1 % изменчивости прироста в высоту (Paine et al., 2015). Аналогичным образом проведено детальное изучение деревьев на лесном участке площадью 50 га в Барро-Колорадо на острове Айленд в Панаме и обнаружено, что LMA объясняет менее 8 % изменчивости прироста в высоту. При этом названный показатель составил 18–24 % у молодых и 1.7–6.7 % у спелых деревьев, что свидетельствует о снижении вклада функциональных признаков в объяснение изменчивости ростовых показателей по мере увеличения возраста деревьев (Wright et al., 2010).

Для понимания функциональных стратегий растений важна информация об архитектурных особенностях деревьев, в частности о размере кроны (Falster et al., 2011; Iida et al., 2014; Klipel et al., 2024; Owen, Lines, 2024), определяющей степень перехвата солнечной радиации, они связаны с темпами роста деревьев (Liu et al., 2016) и в глобальном масштабе влияют на способность конкурировать за пространство роста и определяют компромисс между максимальным поглощением света и отложением ассимилятов в кроне (Maynard et al., 2022).

С учетом сказанного для лучшего объяснения варьирования скорости роста деревьев был

введен интегральный показатель, объединяющий функциональный признак на уровне органа растения (LMA) и площадь горизонтальной проекции кроны (далее – площадь кроны) как характеристику на уровне всего растения (Rubio et al., 2021). Произведение двух названных признаков (M_p), а также площадь кроны, поверхностная плотность листьев и диаметр ствола на высоте груди были проанализированы по данным 111 деревьев в Пуэрто Рико в связи с относительным приростом диаметра ствола. Оказалось, что каждый из них в отдельности вносит один и тот же вклад в объяснение изменчивости прироста (индекс Акайке 28.4–28.5) (Rubio et al., 2021). С другой стороны, по данным 1144 деревьев 125 видов, представляющих 41 ботаническое семейство, вклад LMA в объяснение изменчивости прироста по диаметру ствола оказался статистически незначим, тогда как произведение LMA на площадь кроны (т. е. M_p) объясняло 31 % изменчивости прироста диаметра ствола (Klipel et al., 2024). Еще в одном исследовании по четырем видам Китая показано, что изменчивость относительной скорости роста деревьев объясняется уровнем LMA от 0.1 до 12 %, тогда как значением M_p – от 31 до 82 % (Yang et al., 2018).

Таким образом, функциональные признаки (продукционные показатели) SLA и LMA сильно варьируют как в пределах кроны отдельного дерева, так и у деревьев разной степени угнетения в пологе (Klipel et al., 2024). Рассмотрение LMA в контексте архитектуры кроны, т. е. на уровне M_p , не дает однозначного повышения его вклада в объяснение изменчивости показателей скорости роста деревьев (Rubio et al., 2021). Получение значений продукционных показателей SLA, LMA, M_p в реальных условиях, на региональном уровне охватывающих большой диапазон возраста и размеров деревьев, довольно трудоемко. Вследствие невозможности определения SLA и M_p с достаточной точностью в больших совокупностях деревьев, в настоящем анализе мы заменяем их другим продукционным показателем – отношением массы листвы (хвои) к площади кроны (P_f/S_c).

Цель настоящего исследования – выяснить, в каком соотношении при моделировании прироста стволов деревьев может состоять объяснительная способность продукционного показателя P_f/S_c и совокупности таксационных признаков, таких как диаметр ствола, высота и возраст дерева.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исследования проведены в бору Аман-Карагай в условиях сухой степи Тургайского прогиба (53°10' с. ш., 64°00' в. д.), где в чистых сосновых насаждениях было заложено 30 пробных площадей. Согласно выполненной таксации, возраст древостоев составил 13–110 лет, средний диаметр 1.7–27.0 см, средняя высота 2.7–23.0 м, густота 0.40–82.4 тыс. экз./га, класс бонитета Ia–Va. На каждой пробной площади взято по 10 модельных деревьев в диапазоне их диаметров. До валки дерева мерной лентой измеряли диаметр кроны в двух перпендикулярных направлениях, после валки – длину ствола и выпи-ливали диск на расстоянии 1.3 м от пня (высоты груди), затем в лабораторных условиях измеряли в перпендикулярных направлениях диаметры диска в коре и без коры, а также с помощью измерительного микроскопа радиальные приросты, средние за 5 и 10 лет, в четырех направлениях. По ним для каждого дерева рассчитывали средние значения радиального прироста и прироста площади сечения ствола за 5 и 10 лет. Крону делили на три секции вдоль по стволу, у каждой секатором обрезали охвоенные побеги, взвешивали, затем брали навеску массой около 1 кг и отделяли хвою. После сушки навесок хвои

в термостате определяли ее массу в абсолютно сухом состоянии и по соотношению масс хвои и побегов в навеске рассчитывали массу хвои каждой секции кроны и дерева в целом. Характеристика полученных данных по 300 модельным деревьям представлена в табл. 1.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

С использованием исходных данных (см. табл. 1) рассчитана последовательность аллометрических моделей в разном сочетании зависимых и независимых переменных. На первом этапе построены парные зависимости каждого из приростов как с продукционным показателем P_f/S_c , так и с диаметром ствола на высоте груди как наиболее информативным таксационным показателем (табл. 2).

$$\ln(Z) = a_0 + a_1 \ln(P_f/S_c); \quad (1)$$

$$\ln(Z) = a_0 + a_1 \ln(D). \quad (2)$$

По данным табл. 2 можно сделать вывод, что изменчивость радиальных приростов в большей степени объясняется продукционным показателем (28–33 %) нежели диаметром ствола (7–8 %). В отношении изменчивости приростов по площади сечения ствола столь большой раз-

Таблица 1. Биопродукционные показатели 300 модельных деревьев

Обозначение	Показатель	Значение
<i>A</i>	Возраст дерева, лет	9–110
<i>D</i>	Диаметр ствола на высоте груди в коре, см	0.34–34.5
<i>H</i>	Высота дерева, м	1.6–26.1
P_f	Масса хвои дерева в абсолютно сухом состоянии, кг	0.02–17.8
S_c	Площадь горизонтальной проекции кроны, м ²	0.1–14.9
<i>Z5</i>	Годичные радиальные приросты ствола на высоте груди, средние за 5 лет, мм	0.1–6.5
<i>Z10</i>	То же, за 10 лет, мм	0.1–6.2
<i>Zs5</i>	Приросты по площади сечения ствола на высоте груди, накопленные за 5 лет, см ²	0.03–13.1
<i>Zs10</i>	То же, за 10 лет, см ²	0.02–18.8

Таблица 2. Зависимость прироста ствола от продукционных показателей и диаметра ствола (модели 1 и 2)

Прирост $\ln(Z)$	$Z = f(P_f/S_c)$				$Z = f(D)$			
	a_0	a_1	$adjR^2$	SE	a_0	a_1	$adjR^2$	SE
$\ln(Z5)$	0.2944	0.4103	0.331	0.81	-0.5745	0.3405	0.069	0.97
$\ln(Z10)$	0.6253	0.3488	0.281	0.78	-0.2193	0.3349	0.079	0.89
$\ln(Zs5)$	1.6318	1.2543	0.612	0.91	-1.8874	1.3382	0.573	0.94
$\ln(Zs10)$	1.9889	1.1553	0.548	0.96	-1.5773	1.3534	0.620	0.87

Примечание. В свободный член a_0 введена поправка на логарифмирование (SE)²/2 (Baskerville, 1972); $adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка уравнения.

Таблица 3. Зависимость прироста ствола от продукционных и таксационных показателей (модель 3)

Прирост ln (Z)	$Z = f(P_f/S_c, A, D, H)$						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$adjR^2$	SE
ln (Z5)	3.6862	0.2032	-1.2507	1.0062	-0.8347	0.743	0.50
ln (Z10)	4.1504	0.0632	-1.4886	1.0720	-0.6172	0.820	0.39
ln (Zs5)	2.1523	0.3492	-1.1269	1.9917	-0.8379	0.885	0.49
ln (Zs10)	2.5938	0.1205	-1.4216	2.0514	-0.5560	0.920	0.40

ницы в объяснительной способности продукционного и таксационного показателя нет, и она практически отсутствует, составляя соответственно 55–61 и 57–62 %.

На следующем этапе анализируем многофакторные зависимости приростов (Z) от продукционного и таксационных показателей (табл. 3) согласно модели

$$\ln(Z) = a_0 + a_1 \ln(P_f/S_c) + a_2 \ln(A) + a_3 \ln(D) + a_4 \ln(H). \quad (3)$$

Все регрессионные коэффициенты в моделях 3 значимы на уровне вероятности $p < 0.01$, однако вклады продукционного показателя и высоты дерева в объяснение изменчивости приростов оказались наименьшими. Фактические вклады продукционного показателя, высоты дерева и возраста с диаметром ствола в объяснение изменчивости приростов составили соответственно для Z5 – 19, 15 и 66 %; для Z10 – 6, 12 и 82 %, для Zs5 – 17, 12 и 71 %, для Zs10 – 6, 9, 85 %.

Поскольку переменные P_f/S_c и H вносят наименьшие вклады в объяснение изменчивости приростов, (особенно для Zs10 – всего 15 %), названные две независимые переменные исключены из анализа и рассчитаны модели окончательного вида:

$$\ln(Z) = a_0 + a_1 \ln(A) + a_2 \ln(D). \quad (4)$$

Характеристика полученных расчетом моделей приведена в табл. 4.

Таблица 4. Зависимость прироста от возраста и диаметра ствола (модель 4)

Прирост ln (Z)	$Z = f(A, D)$				
	a_0	a_1	a_2	$adjR^2$	SE
ln (Z5)	3.9492	-1.7647	0.7930	0.688	0.56
ln (Z10)	4.2958	-1.7612	0.7875	0.804	0.41
ln (Zs5)	2.4979	-1.7495	1.8399	0.852	0.56
ln (Zs10)	2.7820	-1.7383	1.8520	0.912	0.42

Модели действительны в диапазонах фактических данных A и D (см. табл. 1).

Используемый в данном исследовании продукционный показатель P_f/S_c представляет массу хвои, приходящуюся на единицу площади кроны, его можно назвать поверхностной плотностью хвои на уровне дерева. Продукционный показатель M_p представлен, как ранее упоминалось, поверхностной плотностью хвои на уровне органа, экстраполированной до уровня дерева умножением на площадь кроны. Безусловно, биологический смысл продукционных показателей M_p и P_f/S_c различается, но в данном исследовании важен не столько их биологический контекст, сколько информативность в отношении прироста деревьев.

Как было упомянуто выше, в субтропиках Пуэрто Рико (Rubio et al., 2021) при анализе парных связей прироста по диаметру ствола с M_p и D обе независимые переменные показали одинаковую объяснительную способность. Согласно нашим моделям 1 и 2 (см. табл. 2), в отношении радиальных приростов продукционный показатель P_f/S_c по сравнению с диаметром ствола показал 4-кратное преимущество в информационном отношении, а в отношении приростов площади сечения их информативность практически одна и та же. Можно заключить, что информативность P_f/S_c в отношении приростов ствола, по крайней мере, не ниже, чем M_p .

В Пуэрто Рико прирост по диаметру определен за 15-летний период на постоянной пробной площади, а в нашем исследовании древостои представлены возрастным спектром от 9 до 110 лет, с существенным варьированием ценологических (густота от 0.40 до 82.4 тыс. экз./га) и эдафических (класс бонитета от Ia до Va) условий. Соответственно, при дополнительном включении в модели 1 и 2 возраста и высоты деревьев, таксационные показатели в модели 3 взяли на себя основную долю варьирования возрастной, ценологической и эдафической изменчивости прироста.

Судя по результатам расчета модели 4 (табл. 4), наиболее перспективной при моделировании прироста ствола оказалась зависимость Z_{s10} от возраста и диаметра ствола, объясняющая 91 % изменчивости прироста. При этом вклады возраста и диаметра ствола в объяснение изменчивости прироста составили соответственно 36 и 64 %. Функционал библиотеки Statsmodels (2024) применен для расчета коэффициента инфляции дисперсии (VIF). Установлено, что VIF переменных A и D составил 3.6, что ниже значения VIF, равного 5, допускаемого при умеренной корреляции признаков (Репина и др., 2019). Следовательно, модель 4 для прироста площади сечения ствола можно характеризовать умеренным ($VIF < 5$) уровнем корреляции возраста и диаметра ствола, поскольку, как ранее упоминалось (Цепордей и др., 2024), полной ортогональности или полного отсутствия мультиколлинеарности при моделировании природных объектов достичь практически невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по фактическим данным 300 модельных деревьев, взятых на 30 пробных площадях в чистых одновозрастных сосняках в Тургайском прогибе в условиях сухой степи, выполнен анализ прироста стволов деревьев в связи с их продукционным и таксационными показателями. Продукционный показатель представлен отношением массы хвои к площади горизонтальной проекции кроны, а таксационные показатели – возрастом, диаметром ствола и высотой дерева.

Установлено, что из включенных в анализ четырех показателей прироста наибольшую адекватность исходным данным показал прирост площади сечения ствола за последние 10 лет. При включении в многофакторную модель названного прироста в качестве независимых переменных продукционного и таксационных показателей оказалось, что продукционный показатель объясняет всего 6 %, а высота дерева – 9 % изменчивости прироста.

В итоге предложена зависимость прироста площади сечения ствола за последние 10 лет от возраста и диаметра ствола, характеризуемая коэффициентом детерминации 0.912. Вклады возраста дерева и диаметра ствола в объяснение изменчивости прироста составили соответственно 36 и 64 %, а коэффициент инфляции дисперсии (VIF) оказался равным 3.6, что ниже значения 5,

допускаемого при умеренной взаимной корреляции независимых переменных.

Предложенная модель может быть использована при моделировании прироста площади сечения стволов на уровне древостоев в сосняках степной зоны. В одновозрастных древостоях для этого достаточно выполнить пересчет деревьев по ступеням толщины и табулировать предложенную модель по значениям возраста и диаметра ствола.

Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Репина Е. Г., Цыпин А. П., Зайчикова Н. А., Ширнаева С. Ю. Эконометрика в табличном редакторе MS Excel: практикум. Самара: Самар. гос. экон. ун-т, 2019.
- Уткин А. И., Ермолова Л. С., Уткина И. А. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008. 292 с.
- Цепордей И. С., Усольцев В. А., Норицин Д. В. Сопряженность климатических показателей в широтном градиенте при моделировании фитомассы лесобразующих видов Евразии // Сиб. лесн. журн. 2024. № 1. С. 40–48.
- Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Can. J. For. Res. 1972. V. 2. N. 1. P. 49–53.
- Chacón-Labelle J., Hinojo-Hinojo C., Bohner T., Castorena M., Violle C., Vandvik V., Enquist B. J. How to improve scaling from traits to ecosystem processes // Trends Ecol. Evol. 2023. V. 38. P. 228–237.
- Falster D. S., Brännström Å., Dieckmann U., Westoby M. Influence of four major plant traits on average height, leaf-area cover, net primary productivity, and biomass density in single-species forests: A theoretical investigation // J. Ecol. 2011. V. 99. P. 148–164.
- Iida Y., Poorter L., Sterck F., Kassim A. R., Potts M. D., Kubo T., Takashi S. K. Linking size-dependent growth and mortality with architectural traits across 145 co-occurring tropical tree species // Ecology. 2014. V. 95. N. 2. P. 353–363.
- Klipel J., da Cunha Morales D., Bordin K. M., Picoletto R. C., Bergamin R. S., Müller S. C. The role of tree crown on the performance of trees at individual and community levels: whole-phenotypic context matters // Plant Ecol. 2024. (preprint).
- Laurans M., Munoz F., Charles-Dominique T., Heuret P., Fortunel C., Isnard S., Sabatier S.-A., Caraglio Y., Violle C. Why incorporate plant architecture into trait-based ecology? // Trends Ecol. Evol. 2024. V. 39. N. 6. P. 524–536.
- Lebrija-Trejos E., Reich P. B., Hernández A., Wright S. J. Species with greater seed mass are more tolerant of conspecific neighbours: a key driver of early survival and future abundances in a tropical forest // Ecol. Lett. 2016. V. 19. P. 1071–1080.
- Liu X., Swenson N. G., Lin D., Mi X., Umaña M. N., Schmid B., Ma K. Linking individual-level functional traits to tree growth in a subtropical forest // Ecology. 2016. V. 97. P. 2396–2405.

- Maynard D. S., Bialic-Murphy L., Zohner C. M., Averill C., van den Hoogen J., Ma H., Mo L., Smith G. R., Acosta A. T. R., Aubin I., Berenguer E., Boonman C. C. F., Catford J. A., Cerabolini B. E. L., Dias A. S., González-Melo A., Hietz P., Lusk C. H., Mori A. S., Niinemets Ü., Pillar V. D., Pinho B. X., Rosell J. A., Schurr F. M., Sheremetev S. N., da Silva A. C., Sosinski Ê., van Bodegom P. M., Weiher E., Bönisch G., Kattge J., Crowther T. W. Global relationships in tree functional traits // *Nat. Comm.* 2022. V. 13. Article 3185.
- Owen H. J. F., Lines E. R. Common field measures and geometric assumptions of tree shape produce consistently biased estimates of tree and canopy structure in mixed Mediterranean forests // *Ecol. Indic.* 2024. V. 165. Article 112219.
- Paine C. E. T., Amissah L., Auge H., Baraloto C., Baruffol M., Bourland N., Bruelheide H., Daïnou K., de Gouvenain R. C., Doucet J.-L., Doust S., Fine P. V. A., Fortunel C., Haase J., Holl K. D., Jactel H., Li X., Kitajima K., Koricheva J., Martinez-Garza C., Messier C., Paquette A., Philipson C., Piotta D., Poorter L., Posada J. M., Potvin C., Rainio K., Russo S. E., Ruiz-Jaen M., Scherer-Lorenzen M., Webb C. O., Wright S. J., Zahawi R. A., Hector A. Globally, functional traits are weak predictors of juvenile tree growth, and we do not know why // *J. Ecol.* 2015. V. 103. N. 4. P. 978–989.
- Poorter L., Castilho C. V., Schiatti J., Oliveira R. S., Costa F. R. C. Can traits predict individual growth performance? A test in a hyper diverse tropical forest // *New Phytol.* 2018. V. 219. P. 109–121.
- Poorter L., Rozendaal D. M. A., Bongers F., de Almeida-Cortez J. S., Zambrano A. M. A., Alvarez F. S., Andrade J. L., Villa L. F. A., Balvanera P., Becknell J. M., Bentos T. V., Bhaskar R., Boukili V., Brancalion P. H. S., Broadbent E. N., César R. G., Chave J., Chazdon R. L., Colletta G. D., Craven D., de Jong B. H. J., Denslow J. S., Dent D. H., DeWalt S. J., García E. D., Dupuy J. M., Durán S. M., Santo M. M. E., Fandiño M. C., Fernandes G. W., Finegan B., Moser V. G., Hall J. S., Hernández-Stefanoni J. L., Jakovac C. C., Junqueira A. B., Ken-
 nard D., Lebrija-Trejos E., Letcher S. G., Lohbeck M., Lopez O. R., Marín-Spiotta E., Martínez-Ramos M., Martins S. V., Massoca P. E. S., Meave J. A., Mesquita R., Mora F., de Souza Moreno V., Müller S. C., Muñoz R., Muscarella R., de Oliveira Neto S. N., Nunes Y. R. F., Ochoa-Gaona S., Paz H., Peña-Claros M., Piotta D., Ruiz J., Sanaphre-Villanueva L., Sanchez-Azofeifa A., Schwartz N. B., Steininger M. K., Thomas W. W., Toledo M., Uriarte M., Utrera L. P., van Breugel M., van der Sande M. T., van der Wal H., Veloso M. D. M., Vester H. F. M., Vieira I. C. G., Villa P. M., Williamson G. B., Wright S. J., Zanini K. J., Zimmerman J. K., Westoby M. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time // *Nat. Ecol. Evol.* 2019. V. 3. P. 928–934.
- Rubio V. E., Zambrano J., Iida Y., Umaña M. N., Swenson N. G. Improving predictions of tropical tree survival and growth by incorporating measurements of whole leaf allocation // *J. Ecol.* 2021. V. 109. P. 1331–1343.
- Shipley B., De Bello F., Cornelissen J. H. C., Laliberté E., Laughlin D. C., Reich P. B. Reinforcing loose foundation stones in trait based plant ecology // *Oecologia.* 2016. V. 180. P. 923–931.
- Statsmodels, 2024. <https://www.statsmodels.org/stable/index.html>
- Violle C., Navas M.-L., Vile D., Kazakou E., Fortunel C., Hummel I., Garnier E. Let the concept of trait be functional! // *Oikos.* 2007. V. 116. P. 882–892.
- Voltaire F., Gleason S. M., Delzon S. What do you mean “functional” in ecology? Patterns versus processes // *Ecol. Evol.* 2020. V. 10. P. 11875–11885.
- Wright S. J., Kitajima K., Kraft N. J. B., Reich P. B., Wright I. J., Bunker D. E., Condit R., Dalling J. W., Davies S. J., Díaz S., Engelbrecht B. M., Harms K. E., Hubbell S. P., Marks C. O., Ruiz-Jaen M. C., Salvador C. M., Zanne A. E. Functional traits and the growth–mortality trade-off in tropical trees // *Ecology.* 2010. V. 91. P. 3664–3674.
- Yang J., Cao M., Swenson N. G. Why functional traits do not predict tree demographic rates // *Trends Ecol. Evol.* 2018. V. 33. N. 5. P. 326–336.

DEPENDENCE OF ANNUAL STEM INCREMENT ON INVENTORY AND BIOPRODUCTION INDICATORS OF TREES IN PINE FORESTS OF THE TURGAY DEPRESSION

V. A. Usoltsev^{1,2}

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

² *Ural State Forestry Engineering University
Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation*

E-mail: Usoltsev50@mail.ru

The development of ecology implies the possibility of predicting the ecological functions of plants based on their functional characteristics, in particular, the specific leaf area, as the ratio of leaf surface area to their dry weight (SLA), and leaf mass per area (LMA), as the inverse of SLA. However, it was found that at the global level, SLA explains only 3.1 % of the variability in tree height growth. The introduction and use of the integral production feature M_p , as the product of LMA and the area of the horizontal projection of the crown, showed that the explanation of the variability of tree stem growth on the community of 125 species increased to 31 %, but, at the same time, did not show the advantages of M_p in the explanatory ability of the variability of growth compared with the stem diameter. The purpose of this study is to find out in what ratio, when modeling the tree stem growth, the explanatory power of a production indicator and a set of taxation features, such as stem diameter, tree height and tree age, may consist. For this purpose, according to the data of 300 sample trees taken on 30 sample plots in pure Scots pine forests of the Turgai Depression, a sequence of allometric models in a different combination of dependent and independent variables was calculated. Due to the too high complexity of determining the SLA with sufficient accuracy for 300 trees, the quotient of dividing the needle mass by the area of the horizontal projection of the crown (P_f/S_c) was used as a production indicator. This production indicator has a biological meaning, slightly different from M_p , but in terms of information it is not inferior to the latter. It was found that when calculating the multifactorial dependence of the stem cross-sectional area growth over the past 10 years on (P_f/S_c) and forest inventory indicators of trees, the contribution of (P_f/S_c) to the explanation of the growth variability was only 6 % and it was excluded from the analysis. As a result, a two-factor allometric model of the stem cross-sectional area growth over 10 years on the age and stem diameter at breast height is proposed, explaining 91 % of the variability of the growth. The proposed model makes it possible to determine the cross-sectional area basal growth of a stand in the single-aged pine forests based on the results of the accounting trees by stem diameters.

Keywords: *functional characteristics of trees, taxation indicators of trees, tree cross-sectional area growth, explanatory ability, allometric models.*

How to cite: *Usoltsev V. A. Dependence of annual stem increment on inventory and bioproduction indicators of trees in pine forests of the Turgay depression // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 6. P. 52–58 (in Russian with English abstract and references).*