

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА СМЕШАННЫХ ДРЕВОСТОЕВ ПОЙМЕННЫХ ЛЕСОВ УРАЛА

ХЛЮСТОВ Виталий Константинович, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

ЕЛЕКЕШЕВА Мира Манаровна, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

ТОКТАСЫНОВ Жайлау Нурмухамедович, Казахское лесоустроительное предприятие

Приведены результаты анализа хода роста средней высоты и диаметра элементов смешанных древостоев, произрастающих в пойменных лесах Западно-Казахстанской части бассейна реки Урал. Лесорастительные условия объектов исследования классифицируются ландшафтно-типологической группой мест произрастания насаждений – осокорники средних уровней прирусловые (ОСПР). Элементы дендроценозов представлены вязом гладким, ивой белой, тополем белым и черным. Показаны многомерные уравнения хода роста средней высоты, среднего диаметра, сочетающие в себе ростовую функцию с бинарными переменными, кодирующими вид древесной породы. Выявлены расхождения в темпах роста морфометрических показателей и подготовлены основания для разработки экологических нормативов хода роста.

Актуальность исследования определена необходимостью изучения закономерностей роста и продуктивности смешанных древостоев в экологических условиях естественного формирования пойменных насаждений реки Урал. В настоящее время лесное хозяйство Западно-Казахстанской области не располагает необходимыми нормативно-справочными материалами для достоверной оценки хода роста отдельных элементов дендроценоза [2, 4]. Как следствие, отсутствует научно обоснованная система оптимизации режима промежуточного и главного пользования древесиной, направленная на повышение продуктивности лесов региона [1, 5, 6]. Только усовершенствование и обновление лесотаксационных нормативов с учетом ландшафтно-экологических условий позволит решить проблему как текущей инвентаризации лесных насаждений, так и прогнозирования динамики роста древостоев.

В отличие от принятых в России классификационных схем типов леса и типов лесорастительных условий в Западно-Казахстанской части бассейна реки Урал принята ландшафтно-типологическая классификация мест произрастания насаждений [3]. Поэтому и результаты исследований, полученные по данным с правобережной части бассейна реки на территории Оренбургской области, существенным образом отличаются от наших.

Цель данного исследования – выявление закономерностей хода роста и продуктивности отдельных элементов дендроценоза в естественно формирующихся смешанных на-

саждениях ландшафтно-типологической группы – осокорники средних уровней прирусловые (ОСПР).

Методика исследований. В связи с поставленной целью проводили статистическую оценку дендрометрических данных: средних значений высоты и диаметра стволов совместно произрастающих древесных пород – вяза гладкого (*Ulmus laevis* Pall.), ивы белой (*Salix alba*), тополя белого (*Populus alba*) и тополя черного (*Populus nigra*) – в разном возрасте древостоев.

Были построены многомерные статистические модели хода роста по средней высоте и диаметру древостоев для конкретной ландшафтно-типологической группы типов леса; дана оценка возможных уровней продуктивности и представлена типизация кривых хода роста по средней высоте и среднему диаметру для каждого элемента дендроценоза.

Использовали данные 16 пробных площадей в ландшафтно-типологической группе типов леса ОСПР, со сплошным измерением высот и диаметров деревьев в количестве 7230 шт. Наряду с этим была проведена прицельно измерительная таксация средних высот и средних диаметров стволов деревьев по элементам дендроценоза на 1428 лесотаксационных выделах.

Статистический анализ дендрометрических данных (средних значений высот и диаметров стволов деревьев) у совместно произрастающих конкретных древесных пород предусматривал оценку возрастного (по 10-летиям) изменения средних значений высот ($H, м$) и диаметров ($D, см$), ошибок и точности их определения ($\pm m_D, см$;





$\pm m_H, \text{м}; \pm P_D, \%; \pm P_H, \%$), величины стандартного отклонения ($\sigma_H, \text{м}; \sigma_D, \text{см}$), размаха варьирования ($H_{\min}, H_{\max}; D_{\min}, D_{\max}$) и коэффициента вариации ($V_H, \%; V_D, \%$).

Для построения статистических моделей хода роста смешанных древостоев использовали асинхронно дендрологический подход к построению уравнений регрессии, сочетающий синергизм ростовой функции Корсуня-Бакмана и бинарных переменных, кодирующих названия древесных пород, произрастающих в ландшафтно-типологической группе – ОСПР. Асинхронность кривых хода роста оценивали по индексным кривым средней высоты и среднего диаметра древостоев на примере условно принятого базового возраста 30 лет, так как по данным массовой таксации критический возраст насаждений в регионе не превышает 80 лет [5, 6].

Результаты исследований. Перед проведением статистического анализа данных оценивали структуру площадей с преобладанием вяза гладкого (ВГЛ), ивы белой (ИВБ), тополя белого (ТБ) и тополя черного (ТЧ) в ландшафтно-типологической группе – ОСПР. Ранжирование доли участия древесных пород представлено следующим рядом: тополь белый – 70 %, тополь черный – 10 %, ива белая – 15 %, вяз гладкий – 5 %.

Статистический анализ дендрометрических данных, проведенный по десятилетиям, свидетельствует о закономерном возрастном изменении как самих статистических показателей, так и ошибок репрезентативности. По всем анализируемым десятилетиям отношение статистического показателя к его ошибке ($t = \text{СП}/\pm m_{\text{сп}}$) значительно больше 3,0, что указывает на достоверность данных для статистического моделирования хода роста элементов дендроценоза.

На этапе построения статистической модели хода роста смешанных древостоев была использована матрица бинарных переменных, кодирующих названия древесных пород при формировании массива данных, представленных блоковыми фиктивными переменными (табл. 1).

Таблица 1

Матрица бинарных переменных, кодирующих названия древесных пород при построении уравнений регрессии

Древесная порода	Блоковые фиктивные переменные		
	X_1	X_2	X_3
ВГЛ	0	0	0
ИВБ	1	0	0
ТБ	0	1	0
ТЧ	0	0	1

Синергетическое сочетание блоковых фиктивных переменных с возрастом позволило построить уравнение регрессии по средней высоте:

$$H = \exp(-1,93922 + 1,80468 \ln A - 0,16558 \ln^2 A + \ln A(0,38679X_1 + 0,45229X_2 + 0,46133X_3) + \ln^2 A(-0,08422X_1 - 0,08770X_2 - 0,09846X_3)) \quad (1)$$

$$R^2 = 0,989; m_R = 0,063; F = 469,5$$

$$\text{при } P < 0,05; t_{\text{рас}} > t_{0,5} = 2,0.$$

Достаточно высокий коэффициент детерминации уравнения ($R^2 = 0,989$), значимость численных коэффициентов ($t_{\text{рас}} > t_{0,5} = 2,0$) указывают на статистическую надежность полученного уравнения хода роста средней высоты из средних значений по массиву данных. Вместе с тем размах варьирования средних высот с возрастом увеличивается и очень тесно связан с усредненной линией регрессии, рассчитанной по уравнению (1).

Для определения минимальных и максимальных значений средних высот достаточно воспользоваться регрессиями вида:

$$H_{\min} = 0,4197H_{\text{сп}}^{1,1367} R^2=0,948, \quad (2)$$

$$H_{\max} = 2,7667H_{\text{сп}}^{0,7987} R^2=0,967. \quad (3)$$

Если в 10-летнем возрасте для вяза гладкого пределы средних высот находятся в диапазоне от 1,9 до 8,1 м, то к 70 годам они уже значительно шире – 9,4–24,7 м. Аналогичная закономерность проявляется у всех лесобразующих пород. Нормативная основа для оценки трех уровней продуктивности (минимального, среднего и максимального) по каждому элементу дендроценоза в условиях ОСПР представлена в табл. 2.

Для визуализации хода роста по высоте, оценки асинхронности динамических изменений в соответствии с уровнями продуктивности и исходными данными представлен рис. 1. На нем отчетливо просматриваются различия в темпах роста как по породам, так и по уровням продуктивности.

Асинхронность кривых хода роста подтверждается индексными кривыми средних высот, выраженных в долях высоты в 30-летнем возрасте (рис. 2).

Представленные индексные кривые хода роста по средней высоте элементов дендроценоза в ОСПР указывают на существенные расхождения в темпах их роста, а также на не-

Ход роста средних высот элементов дендроценоза в трех уровнях размаха варьирования

Возраст, лет	Вяз гладкий			Ива белая			Тополь белый			Тополь чёрный		
	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.
5	0,8	1,7	4,2	1,2	2,6	5,9	1,4	2,8	6,3	1,3	2,8	6,3
10	1,9	3,8	8,1	3,2	5,9	11,5	3,7	6,8	12,8	3,6	6,5	12,4
15	3,0	5,7	11,0	4,9	8,7	15,6	5,8	10,1	17,6	5,5	9,6	16,8
20	4,0	7,3	13,5	6,3	10,8	18,6	7,6	12,8	21,2	7,0	11,9	20,0
25	4,9	8,6	15,5	7,4	12,5	20,8	9,0	14,9	23,9	8,2	13,7	22,4
30	5,6	9,8	17,1	8,3	13,8	22,5	10,2	16,6	26,0	9,2	15,1	24,2
35	6,3	10,8	18,6	9,0	14,8	23,8	11,1	17,9	27,7	9,9	16,1	25,5
40	6,9	11,8	19,8	9,5	15,6	24,8	11,9	18,9	29,0	10,4	16,9	26,5
45	7,5	12,6	20,9	9,9	16,2	25,5	12,4	19,7	29,9	10,8	17,5	27,2
50	7,9	13,3	21,8	10,2	16,6	26,1	12,9	20,4	30,7	11,1	17,9	27,7
55	8,4	13,9	22,7	10,5	17,0	26,5	13,3	20,9	31,3	11,4	18,2	28,1
60	8,8	14,5	23,4	10,7	17,2	26,9	13,5	21,2	31,8	11,5	18,4	28,3
65	9,1	15,0	24,1	10,8	17,4	27,1	13,7	21,5	32,1	11,6	18,5	28,5
70	9,4	15,5	24,7	10,9	17,5	27,2	13,9	21,7	32,3	11,6	18,6	28,5

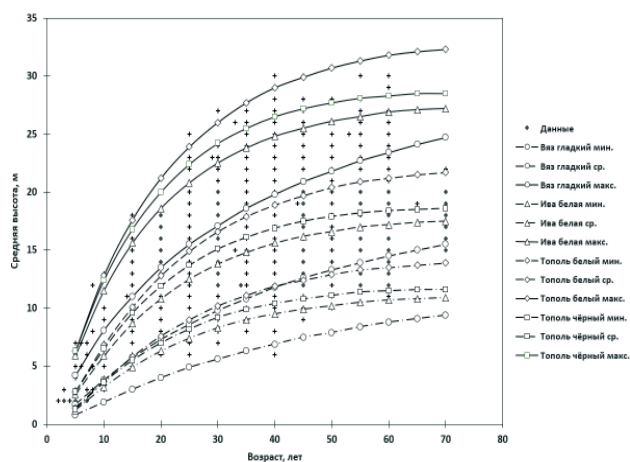


Рис. 1. Линии регрессии хода роста средних высот элементов дендроценоза в трех уровнях размаха варьирования

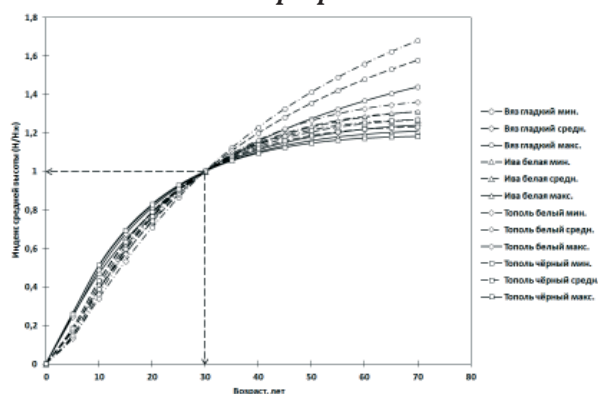


Рис. 2. Индексные кривые хода роста средних высот в смешанных древостоях ОСПР

обходимость составления таблиц хода роста по отдельным древесным породам. При этом в пределах каждой породы следует дифференцировать уровни продуктивности по классам высот с градацией по 1- или 2-метровым ступеням в 30-летнем возрасте древостоев. Такой методический прием позволяет получить для

каждой ландшафтно-типологической группы леса свою шкалу уровней продуктивности древостоев, а это в свою очередь дает полное основание на отказ от условно принятой бонитетной шкалы и переход на экологически обоснованную лесотипологическую шкалу по классам высот.

Наряду с моделированием закономерностей хода роста по средней высоте был проведен аналогичный анализ данных по среднему диаметру деревьев каждого элемента дендроценоза. Была получена регрессионная модель хода роста.

$$D = \exp(-2,44686 + 1,93053 \ln A - 0,13784 \ln^2 A + \ln A(0,29893X_1 + 0,28596X_2 + 0,30645X_3) + \ln 2A(-0,05508X_1 - 0,0434X_2 - 0,05209X_3)).$$

$$R^2 = 0,992; m_R = 0,079; F = 737,2$$

$$\text{при } P < 0,05; t_{\text{рас}} > t_{05} = 2,0. \quad (4)$$

Размах варьирования среднего диаметра определен по аллометрическим уравнениям связи (5) и (6):

$$D_{\min} = 0,8858 D_{\text{ср}}^{0,9139}; R^2 = 0,908; \quad (5)$$

$$D_{\max} = 1,1306 D_{\text{ср}}^{1,0734}; R^2 = 0,941. \quad (6)$$

Довольно высокие статистические характеристики точности уравнений связи указывают на надежность полученных результатов и линий регрессии хода роста во всем диапазоне опытных данных.

Для составления нормативно-справочных материалов следует воспользоваться затабу-



Ход роста средних диаметров элементов дендроценоза в трех уровнях размаха варьирования

Возраст, лет	Вяз гладкий			Ива белая			Тополь белый			Тополь чёрный		
	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.
5	1,2	1,4	1,6	1,6	1,9	2,3	1,6	1,9	2,3	1,6	1,9	2,3
10	2,8	3,6	4,4	4,1	5,3	6,7	4,2	5,5	7,0	4,2	5,5	7,0
15	4,5	5,9	7,6	6,5	8,8	11,7	6,8	9,3	12,3	6,7	9,2	12,2
20	6,0	8,2	10,8	8,7	12,2	16,6	9,2	13,0	17,8	9,1	12,8	17,5
25	7,5	10,4	13,9	10,7	15,3	21,2	11,5	16,6	23,1	11,3	16,2	22,5
30	8,9	12,5	17,0	12,6	18,3	25,5	13,7	20,0	28,2	13,3	19,4	27,2
35	10,2	14,5	20,0	14,3	20,9	29,6	15,7	23,2	33,0	15,1	22,3	31,7
40	11,4	16,4	22,8	15,8	23,4	33,3	17,5	26,1	37,5	16,8	25,0	35,9
45	12,6	18,3	25,5	17,2	25,6	36,8	19,2	28,9	41,8	18,3	27,6	39,7
50	13,7	20,0	28,2	18,5	27,7	40,0	20,7	31,5	45,9	19,8	29,9	43,4
55	14,7	21,7	30,7	19,6	29,6	43,0	22,2	33,9	49,7	21,1	32,1	46,7
60	15,7	23,3	33,1	20,7	31,4	45,7	23,6	36,2	53,3	22,3	34,1	49,9
65	16,6	24,8	35,5	21,7	33,1	48,3	24,8	38,4	56,7	23,4	35,9	52,8
70	17,5	26,2	37,7	22,6	34,6	50,7	26,0	40,4	59,9	24,4	37,7	55,6

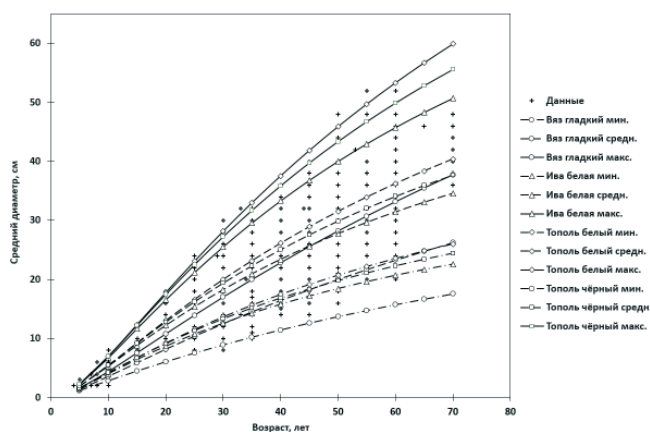


Рис. 3. Линии регрессии хода роста средних диаметров элементов дендроценоза в трех уровнях размаха варьирования

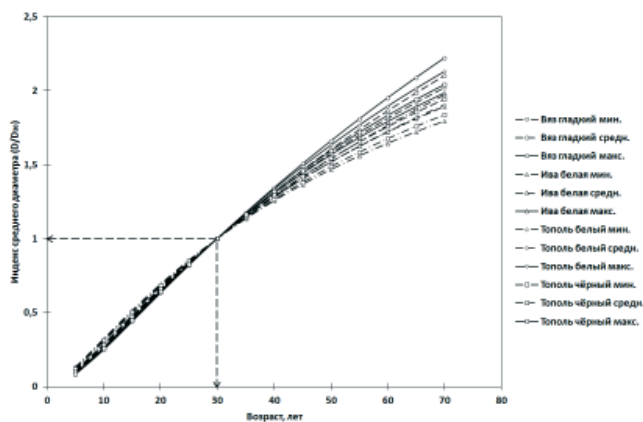


Рис. 4. Индексные кривые хода роста средних высот в смешанных древостоях ОСПР

лированными значениями средних диаметров (табл. 3).

Графическая интерпретация линий регрессии роста всей совокупности элементов дендро-

ценоза указывает на наличие различий как между древесными породами, так и по уровням – $D_{\text{ср}}$, D_{min} , D_{max} , отображающим размах варьирования средних диаметров (рис. 3). О расхождении в темпах изменения роста средних диаметров можно судить по индексным кривым, представленным на рис. 4.

Представленные индексные кривые хода роста по среднему диаметру элементов дендроценоза в ОСПР указывают на менее существенные расхождения в темпах их роста. Их наличие все-таки указывает на необходимость составления таблиц хода роста по отдельным древесным породам с учетом возможного размаха варьирования $D_{\text{ср}}$. При этом для каждой породы следует также задаваться возможными уровнями средней толщины деревьев, как это указано при дифференцировании уровней продуктивности по классам высот. Полагаем, что эти уровни, прежде всего, связаны с густотой древостоев. Это в обязательном порядке следует учитывать при составлении лесотаксационных нормативов.

Таким образом, описанные научно-методические решения задач будут полезны составителям современных таблиц хода роста совокупности древостоев, ориентированных на лесотипологические, а не бонитетные классификации.

Выводы. Установлено, что варьирование средних диаметров и средних высот по классам возраста уменьшается от 40–50 % в молодняках, до 10–20 % в спелых древостоях независимо от древесной породы, составляющей дре-



востои в ландшафтно-типологической группе ОСПР.

Размах варьирования средних высот с возрастом увеличивается и составляет в 70-летних элементах дендроценоза соответственно для вяза гладкого от 9,4 до 24,7 м, ивы белой – 10,9–27,2 м, тополя белого – 13,9–32,3 м, тополя черного – 11,6–28,5 м.

Размах варьирования средних диаметров с возрастом увеличивается и составляет в 70-летних элементах дендроценоза: для вяза гладкого от 17,5 до 37,7 см, ивы белой – 22,6–50,7 см, тополя белого – 26,0–59,9 см, тополя черного – 24,4–55,6 см.

Точность определения средних значений, используемых для моделирования хода роста древостоев по десятилетиям, не превышает $\pm 8\%$ как по средним высотам, так и по средним диаметрам.

Ход роста таксационных показателей элементов смешанных древостоев успешно описывается асинхронно дендрологическими моделями, сочетающими синергизм возраста в ростовой функции с бинарными переменными, кодирующими вид древесной породы.

Существенное расхождение индексных кривых хода роста средних высот связано с видом древесной породы и уровнями ее продуктивности.

Расхождение индексных кривых хода роста средних диаметров значительно меньше, чем у средних высот, и также зависит от древесной породы и размаха варьирования среднего диаметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лямеборшай С.Х., Хлюстов В.К., Градусов В.М. Оптимизация выбора породного состава лесных

культур по эколого-экономическим показателям // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2014. – № 1. – С. 29–33.

2. Нормативы для таксации лесов Казахстана / А.А. Макаренко [и др.]. – Алма-Ата: Кайнар, 1987. – Ч. 1. – Кн. 1. – 237 с.

3. Основные положения организации и развития лесного хозяйства Уральской области. – Алма-Ата, 1992. – 411 с.

4. Сортиментные и товарные таблицы для лесов Казахстана / А.А. Макаренко [и др.]. – Алма-Ата: Кайнар, 1981. – 228 с.

5. Хлюстов В.К. Комплексная оценка и управление древесными ресурсами: Модели – Нормативы – Технологии. – М., 2015. – Кн. 1. – 388 с.

6. Хлюстов В.К. Комплексная оценка и управление древесными ресурсами: Модели – Нормативы – Технологии. – М., 2015. – Кн. 2. – 449 с.

Хлюстов Виталий Константинович, д-р с.-х. наук, проф. кафедры «Лесоводство и мелиорация ландшафтов», Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.

Елекешева Мира Манаровна, аспирант кафедры «Лесоводство и мелиорация ландшафтов», Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.

127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49.

Тел.: (499) 976-04-80.

Токтасынов Жайлау Нурмухамедович, канд. с.-х. наук, эксперт, Казахское лесохозяйственное предприятие. Казахстан.

050002, г. Алматы, ул. Баишева, 23.

Тел.: (727) 372-77-92;

e-mail: tzhailau@mail.ru.

Ключевые слова: ландшафтно-типологическая группа мест произрастания; пойменные насаждения реки Урал; дендрометрические данные насаждений; смешанные древостои; моделирование; ход роста древостоев; индексные кривые роста.

SIMULATION STUDY OF THE GROWTH OF THE COMPOSITE FORESTS IN THE FLOODPLAIN FORESTS OF URAL

Hlyustov Vitaliy Konstantinovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the chair "Forestry and melioration landscapes", Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural Academy. Russia.

Yelekesheva Mira Manarovna, Post-graduate Student of the chair "Forestry and melioration landscapes", Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural Academy. Russia.

Toktasynov Zhailau Nurmukhamedovich, Candidate of Agricultural Sciences, Expert, Kazakh Forest Inventory Enterprise. Kazakhstan.

Keywords: landscape typology of habitat; Ural riparian woodland; dendrometric characteristics of woodlands; composite forest; simulation study; stand development; growth-curve indexes.

We present the results of the analysis of average height and diameter yields of elements of mixed stands growing in the floodplain forests of the West Kazakhstan part of the Ural River catchment area. Site conditions of the study objects are grouped into landscape typology habitats of plants – average levels riparian black poplar stand. The dendrocoenoses elements are made of European white elm, white willow, white and black poplar. This paper also shows multidimensional growth model of the average height and average diameter, that combines the growth function with a binary variable encoding type of tree species. The results clearly show differences in morphometric parameters growth rates and we suggest development of environmental standards for the growth course.

