

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630\*181 (470.343)

DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.12

### ДИНАМИКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ В БОРАХ МАРИЙСКОГО ЛЕСНОГО ЗАВОЛЖЬЯ

**Ю. П. Демаков<sup>1,2</sup>, А. В. Исаев<sup>2</sup>, С. А. Денисов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет,  
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3  
E-mail: DemakovYP@volgatech.net

<sup>2</sup>Государственный заповедник «Большая Кокшага»,  
Российская Федерация, 424038, Йошкар-Ола, ул. Воинов-Интернационалистов, 26  
E-mail: nauka\_gpz@yolamail.ru

*Приведены математические модели динамики производительности и таксовой цены древостоев в борах Марийского Заволжья. Показано, что в данных условиях наиболее целесообразно выращивать сосняки, которые по экономическим и экологическим критериям значительно превосходят часто встречающиеся здесь березняки. Наиболее велика разница между древостоями сосны и берёзы в сухих и заболоченных борах, где условия для их произрастания наиболее экстремальны. Характер роста древостоев по высоте и диаметру в определённой мере зависит от их полноты, влияние которой в разных гигротопах часто диаметрально противоположно, хотя в целом её возрастание приводит к более раннему наступлению кульминации текущего годичного прироста, увеличению средней высоты древостоев и снижению их среднего диаметра.*

**Ключевые слова:** математические модели; сосняки; динамика; средний годичный прирост; типы лесорастительных условий.

**Введение.** Внедрение в практику лесного хозяйства любых инновационных технологий не даст желаемого результата, пока не будет обеспечена устойчивость управления эколого-ресурсным потенциалом лесов [1]. Решение этой задачи, которая является одной из наиболее актуальных для нашего государства [2], превосходящего остальные страны мира по площади лесов и по разнообразию природных и социально-экономических условий, обуславливающих специфику ведения лесного хозяйства в разных его

регионах, невозможно без внедрения новых методов оценки лесных ресурсов, выявления закономерностей их динамики, выраженных в форме адекватных математических моделей [3–14], необходимых для разработки регламентов и планов, предусматривающих получение максимального дохода.

**Целью** работы являлось познание закономерностей динамики производительности древостоев в различных гигротопах боров Марийского Заволжья и отображение их в форме математических моделей.

© Демаков Ю. П., Исаев А. В., Денисов С. А., 2017.

**Для цитирования:** Демаков Ю. П., Исаев А. В., Денисов С. А. Динамика производительности древостоев в борах Марийского лесного Заволжья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 4 (36). С. 12–24. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.12

**Объект и методика исследования.**

Материалом для анализа служила электронная повидельная база данных, содержащая таксационную характеристику древостоев (более 78 тыс. выделов общей площадью 385 184 га), произрастающих в борах Марийского Заволжья, которое входит в состав Ветлужско-Унженской провинции лесной зоны Русской равнины [15]. Климат умеренно-континентальный, средняя годовая температура воздуха равна +3,3 °С, зимой иногда она может опускаться до -47 °С, а летом подниматься до +38 °С. Сумма температур выше +10 °С составляет 1900–2200°, а средняя продолжительность периода с температурой воздуха выше 0 °С – 208 дней [16]. За год в среднем выпадает 475...550 мм осадков, из которых 335...385 мм приходится на апрель–октябрь. Гидротермический коэффициент изменяется по годам от 0,3 до 2,7, составляя в среднем 1,1–1,2.

При решении задачи использовали хорошо отработанную нами информационную технологию, основанную на си-

стемном анализе данных массовой таксации насаждений [17–20]. Обработку материала проводили стандартными методами, используя прикладные программы математической статистики.

**Результаты и их обсуждение.** Ранее нами было показано, что в борах Марийского Заволжья наиболее распространены сосняки, хотя довольно много здесь древостоев с большим участием берёзы [18]. Анализ исходного материала показал, что запас стволовой древесины, который является одним из важнейших показателей ресурсного потенциала древостоев, увеличивается с возрастом лишь до определённого момента времени, а затем неуклонно снижается, что связано с их изреживанием под действием естественных и антропогенных факторов. Изменения этого таксационного параметра с возрастом древостоев наилучшим образом аппроксимирует куполообразная функция оптимума  $Y = 100 \times X / (a \times X^2 - b \times X + c)$ , значения параметров которой специфичны для каждой древесной породы и разных гигротопов (табл. 1).

Таблица 1

**Параметры уравнений динамики запаса древостоев в борах Марийского Заволжья**

ТЛУ	Значения параметров уравнения $Y = 100 \times X / (a \times X^2 - b \times X + c)$					
	$a \cdot 10^{-4}$	$b \cdot 10^{-2}$	c	$A_{кз}$	$M_{кз}$	$R^2$
<i>Сосняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>						
A <sub>1</sub>	68,59	85,14	58,18	93	243	0,952
A <sub>2</sub>	70,65	76,94	45,11	80	278	0,969
A <sub>3</sub>	70,24	81,64	47,74	82	293	0,972
A <sub>4</sub>	50,72	67,12	61,32	110	225	0,963
A <sub>5</sub>	33,08	47,03	92,58	172	157	0,962
<i>Березняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>						
A <sub>1</sub>	182,0	178,8	87,14	70	137	0,966
A <sub>2</sub>	76,11	77,19	53,02	85	201	0,965
A <sub>3</sub>	82,54	83,44	51,50	80	213	0,986
A <sub>4</sub>	208,4	227,6	101,9	70	157	0,991
A <sub>5</sub>	163,1	199,9	137,7	90	100	0,996

**Примечание:** ТЛУ – тип лесорастительных условий; Y – запас стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га; X – возраст древостоев, лет; a, b, c – безразмерные константы модели; A<sub>кз</sub> – возраст наступления кульминации наличного запаса древесины, лет; M<sub>кз</sub> – величина наличного запаса древесины в момент наступления её кульминации, м<sup>3</sup>/га; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации уравнения.

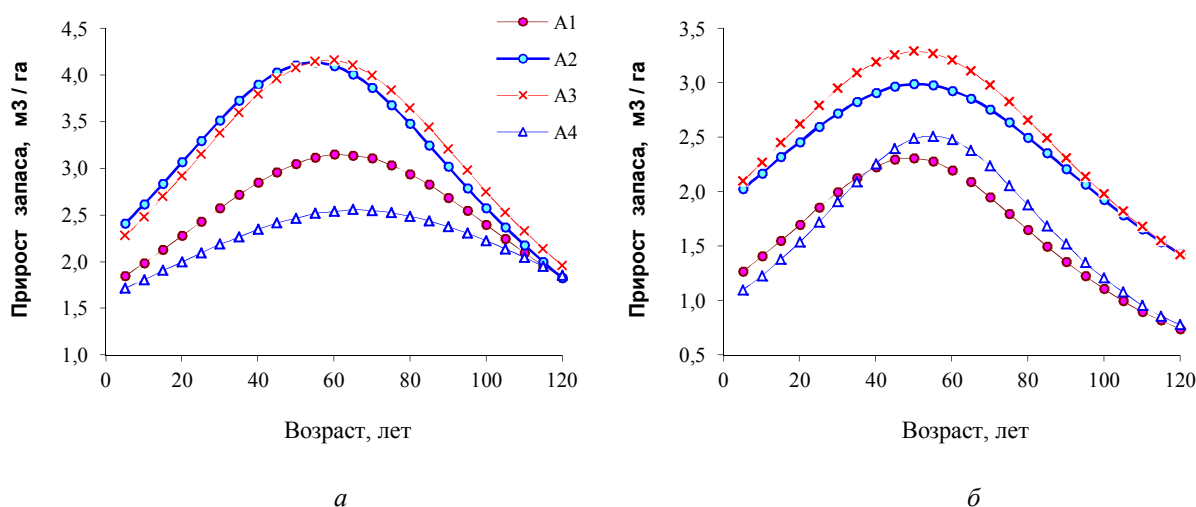


Рис. 1. Динамика среднего годовичного прироста запаса древесины в сосняках (а) и березняках (б), произрастающих в разных гигротопях боров Марийского Заволжья

Кульминация запаса древесины в древостоях с преобладанием сосны в свежих и влажных борах наступает в 80 лет, достигая в среднем соответственно 278 и 292 м<sup>3</sup>/га. В сырых и заболоченных борах его величина наибольших значений достигает в 110 и 170 лет, составляя 225 и 157 м<sup>3</sup>/га. Размах величины запаса между гигротопами достигает 135 м<sup>3</sup>/га. В древостоях с преобладанием берёзы кульминация запаса наступает в сухих, сырых и заболоченных борах раньше, однако его величина в этот момент оказывается намного ниже (на 57–106 м<sup>3</sup>/га). Наиболее велика разница между древостоями сосны и берёзы в сухих борах.

Средний годовичный прирост запаса в древостоях с преобладанием сосны максимальных значений достигает в разных гигротопях в 55–70 лет, составляя во влажных борах 4,16, в свежих – 4,14, в сухих – 3,15, в сырых – 2,56, в заболоченных – 1,32 м<sup>3</sup>/га (рис. 1). В березняках же кульминация его величины наступает в возрасте 50–60 лет, с меньшими чем в сосняках значениями: в свежих борах на 1,15, во влажных – 0,87, в сухих – 0,83 м<sup>3</sup>/га. В сырых и заболоченных борах разница среднего годовичного прироста

запаса древесины между сосняками и березняками практически отсутствует.

Важными характеристиками производности насаждений являются высота и диаметр деревьев, позволяющие оценить объём ствола и абсолютно сухую массу различных их фракций, а также таксовой (корневой) цены древостоев [20]. Расчёты показали, что динамику средней высоты древостоев лучшим образом аппроксимирует асимптотическая функция Митчерлиха  $H = K \times [1 - \exp(-a \times 10^{-3} \times X)]^b$ , значения параметров которой, имеющих конкретный биофизический смысл [2], различаются между древесными породами и гигротопами (табл. 2). Березняки в борах Марийского Заволжья превышают по высоте сосняки (рис. 2). Особенно велики различия в возрасте 20–30 лет. Возраст кульминации текущего годовичного прироста этого таксационного показателя, как свидетельствуют приведённые данные, у березняков наступает на 6–12 лет раньше, чем у сосняков.

Динамику среднего диаметра древостоев лучше всего аппроксимирует степенная функция  $D = a \times (X - c)^b$ , значения параметров которой также видоспецифичны (табл. 3).

Таблица 2

## Параметры уравнений динамики средней высоты древостоев в борах Марийского Заволжья

ТЛУ	Значения параметров уравнения $H = K \times [1 - \exp(-a \times 10^{-3} \times X)]^b$						
	K	a	b	A <sub>кТП</sub>	ΔH <sub>кТП</sub>	H <sub>100</sub>	R <sup>2</sup>
<i>Сосняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>							
A <sub>1</sub>	25,0	28,89	1,896	23	37	22,4	0,992
A <sub>2</sub>	26,3	34,20	1,958	20	45	24,6	0,992
A <sub>3</sub>	26,1	37,56	2,232	22	47	24,8	0,987
A <sub>4</sub>	21,9	31,52	2,137	25	34	19,9	0,979
A <sub>5</sub>	18,5	20,63	1,712	27	20	14,7	0,996
<i>Березняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>							
A <sub>1</sub>	25,7	32,54	1,621	15	46	24,1	0,985
A <sub>2</sub>	27,8	32,55	1,530	14	52	26,2	0,986
A <sub>3</sub>	27,2	34,76	1,454	11	56	26,0	0,997
A <sub>4</sub>	23,6	29,85	1,451	13	42	21,9	0,995
A <sub>5</sub>	19,6	23,79	1,426	15	28	17,1	0,991

**Примечание:** H – средняя высота древостоя, м; X – возраст древостоя, лет; K, a, b – безразмерные константы; A<sub>кТП</sub> – возраст наступления кульминации текущего годовичного прироста, лет; ΔH<sub>кТП</sub> – текущий годовичный прирост деревьев в момент его кульминации, см; H<sub>100</sub> – средняя высота древостоя в возрасте 100 лет, м; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации уравнения.

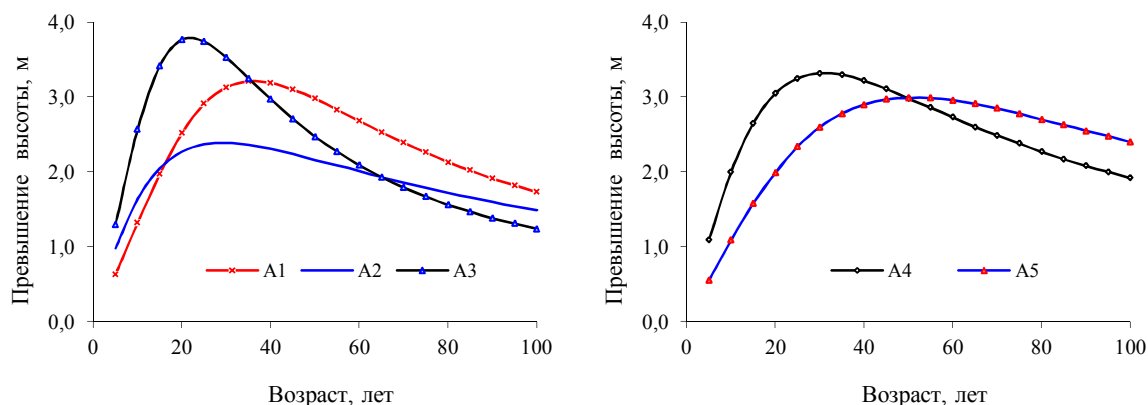


Рис. 2. Динамика превышения средней высоты древостоев берёзы над средней высотой древостоев сосны в борах Марийского Заволжья

Таблица 3

## Параметры уравнений динамики среднего диаметра древостоев в борах Марийского Заволжья

ТЛУ	Значения параметров уравнения $D = a \times (X - c)^b$					
	a	b	c	A <sub>кСП</sub>	D <sub>100</sub>	R <sup>2</sup>
<i>Сосняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>						
A <sub>1</sub>	1,279	0,669	7	20	26,5	0,963
A <sub>2</sub>	1,353	0,674	6	20	28,9	0,981
A <sub>3</sub>	1,415	0,673	4	13	30,5	0,982
A <sub>4</sub>	1,350	0,631	9	25	23,3	0,977
A <sub>5</sub>	1,417	0,572	12	28	18,3	0,965
<i>Березняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>						
A <sub>1</sub>	0,781	0,808	5	26	30,9	0,957
A <sub>2</sub>	1,197	0,708	5	17	30,1	0,985
A <sub>3</sub>	1,107	0,718	4	15	29,3	0,979
A <sub>4</sub>	0,955	0,709	5	17	24,1	0,982
A <sub>5</sub>	0,695	0,746	7	28	20,4	0,987

**Примечание:** X – возраст древостоев, лет; a, b – безразмерные константы; c – возраст достижения деревом высоты 1,3 м, лет; A<sub>кСП</sub> – возраст наступления кульминации среднего годовичного прироста, лет; D<sub>100</sub> – средний диаметр древостоя в возрасте 100 лет, см; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации уравнения.

Расчёты показали, что сосняки в сухих борах Марийского Заволжья приближаются по характеру роста в среднем к III классу бонитета по шкале ВНИИЛМ<sup>1</sup>, в свежих и влажных – II, в сырых – IV, а в заболоченных – V (табл. 4), что в целом не противоречит таксационным характеристикам древостоев по типам лесорастительных условий [21]. Однако до 20 лет их высота значительно ниже нормативных показателей, а с 25 лет выше их (рис. 3). Особенно большие различия отмечаются в возрасте от 35 до 60 лет. Возраст наступления кульминации текущего годовичного прироста этого таксационного показателя наступает на 4–9 лет позднее, чем у древостоев соответствующего класса боните-

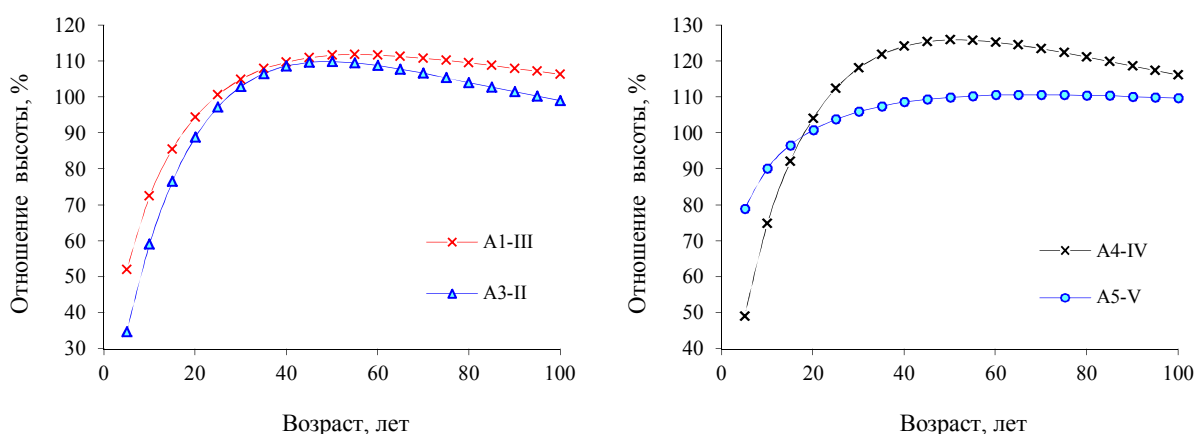
та. Характер роста сосняков по высоте и диаметру в определённой мере зависит от их полноты (табл. 5, 6), влияние которой в разных гигротопах часто диаметрально противоположно (рис. 4, 5), хотя в целом её возрастание приводит к более раннему наступлению кульминации текущего годовичного прироста, увеличению средней высоты древостоев и снижению их среднего диаметра. Из всего изложенного следует, что модели хода роста древостоев, созданные на бонитетной основе, являются искусственными, неадекватно отражая реальную действительность. Их нельзя использовать на практике для познания закономерностей развития древостоев и решения задач по управлению ими.

Таблица 4

**Параметры уравнений динамики средней высоты сосновых древостоев разных классов бонитета, вычисленные по данным таблиц хода роста (ВНИИЛМ)**

Класс бонитета	Значения параметров уравнения $H = K \times [1 - \exp(-a \times 10^{-3} \times X)]^b$					
	K	a	b	$A_{КТП}$	$\Delta H_{КТП}$	$H_{100}$
I	34,7	19,95	1,251	12	46	28,9
II	31,0	18,48	1,259	13	38	25,0
III	26,8	17,84	1,308	16	31	21,1
IV	22,4	17,40	1,378	19	24	17,2
V	17,9	17,20	1,485	23	18	13,4

**Примечание:** H – средняя высота древостоя, м; X – возраст древостоя, лет; K, a, b – безразмерные константы;  $A_{КТП}$  – возраст наступления кульминации текущего годовичного прироста, лет;  $\Delta H_{КТП}$  – текущий годовичный прирост деревьев в момент его кульминации, см;  $H_{100}$  – средняя высота древостоя в возрасте 100 лет, м.



*Рис. 3. Динамика отношения средней высоты сосняков в различных ТЛУ боров Марийского Заволжья к средней высоте древостоев соответствующих классов бонитета*

<sup>1</sup>Лесотаксационный справочник / Б.И. Грошев, С.Г. Сеницын, П.И. Мороз, И.П. Сиперович. М.: Лесная промышленность, 1980. 288 с.

Таблица 5

## Влияние полноты сосняков в борах Марийского Заволжья на динамику их средней высоты

ТЛУ	Полнота	Значения параметров уравнения $H = K \times [1 - \exp(-a \times 10^{-3} \times X)]^b$						
		K	a	b	A <sub>ксп</sub>	ΔH <sub>ксп</sub>	H <sub>100</sub>	R <sup>2</sup>
A <sub>1</sub>	0,3-0,5	24,0	32,19	2,143	24	38	22,0	0,987
	0,6-0,7	26,5	25,49	1,755	23	36	23,0	0,995
	0,8-1,0	28,1	20,82	1,471	16	34	23,1	0,988
A <sub>2</sub>	0,3-0,5	25,6	34,25	2,113	22	43	23,9	0,984
	0,6-0,7	26,3	33,70	1,939	20	45	24,6	0,990
	0,8-1,0	27,4	30,61	1,773	19	44	25,2	0,991
A <sub>3</sub>	0,3-0,5	25,5	41,32	2,641	24	48	24,4	0,989
	0,6-0,7	26,1	36,96	2,175	21	48	24,8	0,985
	0,8-1,0	30,3	25,96	1,672	20	43	26,6	0,983
A <sub>4</sub>	0,3-0,5	23,6	22,90	1,809	26	28	19,5	0,974
	0,6-0,7	21,8	32,29	2,209	25	34	19,9	0,978
	0,8-1,0	21,1	36,53	2,395	24	36	19,8	0,972
A <sub>5</sub>	0,3-0,5	19,9	15,78	1,566	27	18	13,9	0,993
	0,6-0,7	18,6	21,46	1,731	25	21	15,0	0,992
	0,8-1,0	16,4	37,88	2,996	29	28	15,3	0,972

Примечание: обозначения параметров те же, что и в табл. 2.

Таблица 6

## Влияние полноты сосняков в борах Марийского Заволжья на динамику их среднего диаметра

ТЛУ	Полнота	Значения параметров уравнения $D = a \times (X - c)^b$					
		a	b	c	A <sub>ксп</sub>	D <sub>100</sub>	R <sup>2</sup>
A <sub>1</sub>	0,3-0,5	1,126	0,713	7	25	28,5	0,972
	0,6-0,7	1,044	0,724	7	25	27,8	0,982
	0,8-1,0	1,146	0,683	7	20	25,3	0,980
A <sub>2</sub>	0,3-0,5	1,505	0,654	6	17	29,4	0,978
	0,6-0,7	1,369	0,675	6	18	29,4	0,978
	0,8-1,0	1,180	0,703	6	20	28,8	0,981
A <sub>3</sub>	0,3-0,5	1,343	0,687	7	22	30,2	0,978
	0,6-0,7	1,461	0,667	7	21	30,0	0,982
	0,8-1,0	1,348	0,680	7	22	29,4	0,976
A <sub>4</sub>	0,3-0,5	0,975	0,709	9	31	23,9	0,975
	0,6-0,7	1,310	0,638	9	25	23,3	0,973
	0,8-1,0	1,793	0,560	9	20	22,4	0,942
A <sub>5</sub>	0,3-0,5	0,973	0,650	12	34	17,9	0,978
	0,6-0,7	1,515	0,558	12	27	18,4	0,961
	0,8-1,0	1,364	0,581	12	29	18,4	0,971

Примечание: обозначения параметров те же, что и в табл. 3.

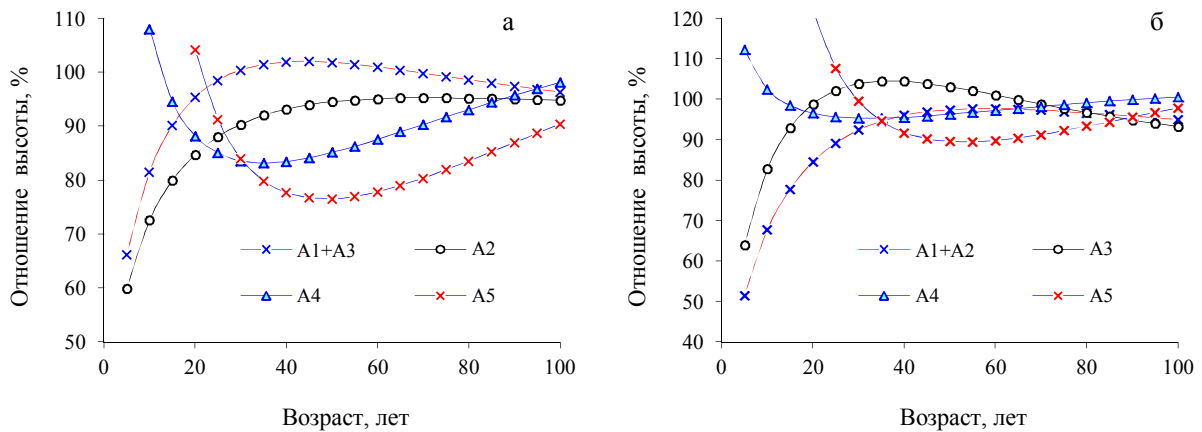


Рис. 4. Динамика отношения средней высоты низко- (а) и среднеполотных (б) сосняков в борах Марийского Заволжья к средней высоте высокополотных древостоев

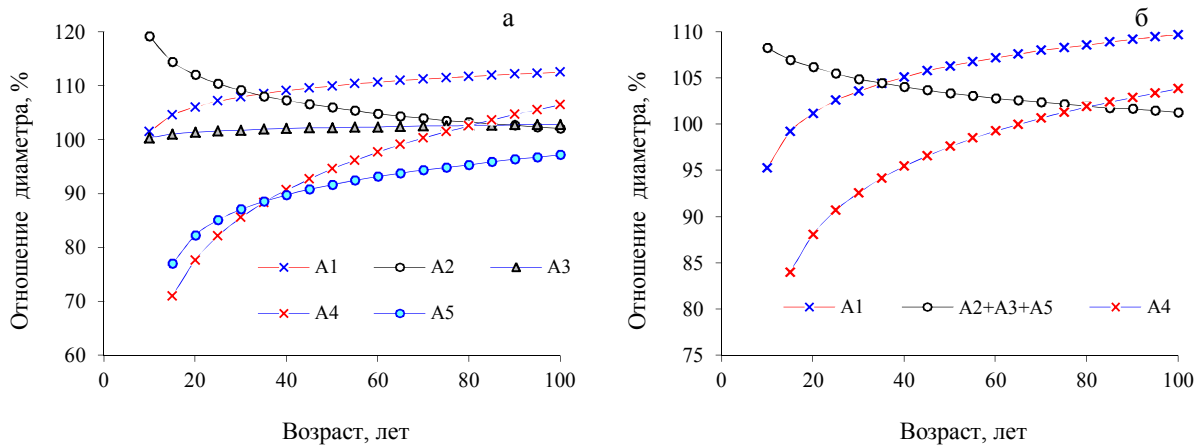


Рис. 5. Динамика отношения среднего диаметра низко- (а) и среднеполотных (б) сосняков в борах Марийского Заволжья к среднему диаметру высокополотных древостоев

Древесный запас далеко не в полной мере отражает ресурсный потенциал насаждений, так как плотность древесины у разных пород деревьев далеко не одинакова. Лучше всего для этой цели использовать их фитомассу, которая является мерой поглощения растениями солнечной энергии и элементов питания, депонирования углерода, выделения кислорода и транспирации воды. Расчёты показали, что динамику наличной массы стволовой древесины описывает функция оптимума  $M = 100X / (aX^2 - bX + c)$ , значения параметров которой специфичны для каждой древесной породы и разных гигротопов (табл. 7). Кульминация величины этого параметра наступает в сосня-

ках свежих и влажных боров в 80–83 года, достигая в среднем соответственно 116,2 и 123,2 т/га. В сырых и заболоченных борах его величина наибольших значений достигает в 110 и 160 лет, составляя 93,8 и 67,0 т/га. Размах значений абсолютно сухой массы стволов между гигротопами достигает 55,3 т/га. В древостоях с преобладанием берёзы кульминация массы стволов наступает во всех экотопах, кроме свежих боров, раньше, однако, её величина в этот момент оказывается в 1,3–1,7 раза ниже. Наиболее велика разница между древостоями сосны и берёзы в сухих и заболоченных борах, где условия для их произрастания наиболее экстремальны.

Таблица 7

**Параметры моделей динамики наличной массы стволовой древесины  
в сосняках и березняках боров Марийского Заволжья**

ТЛУ	Значения параметров математической модели $Y = X/(a \times X^2 - b \times X + c)$						
	$a \cdot 10^{-4}$	$b \cdot 10^{-2}$	c	$A_{KM}$	$M_{KM}$	$A_{KSP}$	$M_{KSP}$
<i>Сосняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>							
A <sub>1</sub>	1,675	2,105	1,427	92	101,3	63	1,31
A <sub>2</sub>	1,713	1,886	1,101	80	116,2	55	1,72
A <sub>3</sub>	1,704	2,000	1,165	83	122,3	59	1,73
A <sub>4</sub>	1,257	1,693	1,514	110	93,8	67	1,06
A <sub>5</sub>	0,868	1,293	2,325	160	67,0	75	0,57
<i>Березняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>							
A <sub>1</sub>	4,238	4,256	2,059	70	60,5	50	1,01
A <sub>2</sub>	1,782	1,866	1,249	84	89,5	52	1,32
A <sub>3</sub>	1,928	2,000	1,210	79	94,8	52	1,45
A <sub>4</sub>	4,850	5,373	2,400	70	68,9	55	1,10
A <sub>5</sub>	3,965	4,993	3,344	92	43,7	63	0,56

**Примечание:** Y – абсолютно сухая масса стволовой древесины без коры, т/га; X – возраст древостоев, лет; a, b, c – безразмерные константы модели;  $A_{KM}$  – возраст наступления кульминации наличной массы стволов, лет;  $M_{KM}$  – величина наличной массы стволовой древесины в момент наступления её кульминации, т/га;  $A_{KSP}$  – возраст наступления кульминации среднего годовичного прироста наличной массы стволовой древесины, лет;  $M_{KSP}$  – величина среднего годовичного прироста массы стволовой древесины в момент наступления её кульминации, т/га.

Таблица 8

**Параметры моделей динамики фитомассы листвы в борах Марийского Заволжья**

ТЛУ	Значения параметров математической модели $Y = X/(a \times X^2 + b \times X + c)$				
	$a \cdot 10^{-4}$	$b \cdot 10^{-2}$	c	$A_{KMЛ}$	$M_{Л}$
<i>Сосняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>					
A <sub>1</sub>	38,31	-27,28	19,33	71	3,68
A <sub>2</sub>	49,66	-38,70	20,27	64	4,04
A <sub>3</sub>	47,83	-39,95	21,84	68	4,05
A <sub>4</sub>	17,01	-1,155	12,91	87	3,50
A <sub>5</sub>	12,20	13,56	11,58	97	2,68
<i>Березняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>					
A <sub>1</sub>	101,5	-70,91	36,95	60	1,94
A <sub>2</sub>	36,02	-14,61	21,03	76	2,47
A <sub>3</sub>	44,57	-27,17	23,84	73	2,63
A <sub>4</sub>	113,8	-100,8	45,11	63	2,35
A <sub>5</sub>	46,26	-21,87	33,27	85	1,77

**Примечание:** Y – абсолютно сухая масса листвы, т/га; X – возраст древостоев, лет; a, b, c – безразмерные константы модели;  $A_{KMЛ}$  – возраст наступления кульминации наличной фитомассы листвы, лет;  $M_{Л}$  – величина наличной фитомассы листвы в момент наступления её кульминации, т/га.

Средний годовичный прирост массы стволов в древостоях с преобладанием сосны максимальных значений достигает в разных гигротобах в 55–75 лет, составляя во влажных борах 1,73, свежих – 1,72, сухих – 1,31, сырых – 1,06, заболоченных – 0,57 т/га. В березняках же кульминация его величины наступает

в возрасте 50–63 года, составляя при этом в свежих борах на 0,40, влажных – на 0,28, сухих – на 0,30 т/га ниже, чем в сосняках. В сырых и заболоченных борах разница среднего годовичного прироста этого таксационного параметра между сосняками и березняками практически отсутствует.



Березняки во всех гиротопах значительно уступают соснякам (в 1,5–1,9 раза) и по фитомассе ассимиляционного аппарата (табл. 8), которая в определённой степени является мерой поглощения растениями солнечной энергии и элементов питания, депонирования углерода, выделения кислорода и транспирации воды.

Ещё более значительно (в 2,20–4,35 раза) березняки уступают соснякам по таксовой цене древесины на корню (табл. 9, рис. 6). Таким образом, в борах Марийского Заволжья целесообразнее выращивать сосняки, которые по экономическим и экологическим критериям значительно превосходят березняки.

Таблица 9

**Параметры моделей динамики таксовой цены древесины в борах Марийского Заволжья**

ТЛУ	Значения параметров математической модели $Y = X/(a \times X^2 - b \times X + c)$						
	$a \cdot 10^{-4}$	$b \cdot 10^{-2}$	c	$A_{\text{KM}}$	$C_{\text{KM}}$	$A_{\text{КСП}}$	$C_{\text{КСП}}$
<i>Сосняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>							
$A_1$	4,577	6,969	5,311	110	34,56	76	376,2
$A_2$	4,308	5,509	3,785	95	38,94	64	494,1
$A_3$	4,235	5,684	3,802	95	42,71	67	527,8
$A_4$	3,941	7,006	6,487	130	32,18	89	296,4
$A_5$	4,201	10,16	12,95	185	21,78	121	146,9
<i>Березняки с долей участия преобладающей породы деревьев более 6 единиц</i>							
$A_1$	29,85	37,28	20,13	80	8,50	62	117,8
$A_2$	13,77	19,16	12,79	95	13,54	70	163,3
$A_3$	14,51	19,48	12,27	90	13,87	67	174,5
$A_4$	38,01	49,23	24,52	80	8,45	65	116,6
$A_5$	41,14	68,32	45,03	105	5,63	83	60,0

**Примечание:**  $Y$  – таксовая цена древесины, тыс. руб./га;  $X$  – возраст древостоев, лет;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – безразмерные константы модели;  $A_{\text{KM}}$  – возраст наступления кульминации таксовой цены древесины, лет;  $C_{\text{KM}}$  – таксовая цена древесины в момент наступления её кульминации, тыс. руб./га;  $A_{\text{КСП}}$  – возраст наступления кульминации среднего годичного прироста таксовой цены древесины, лет;  $C_{\text{КСП}}$  – средний годичный прирост таксовой цены древесины в момент наступления её кульминации, руб./га.

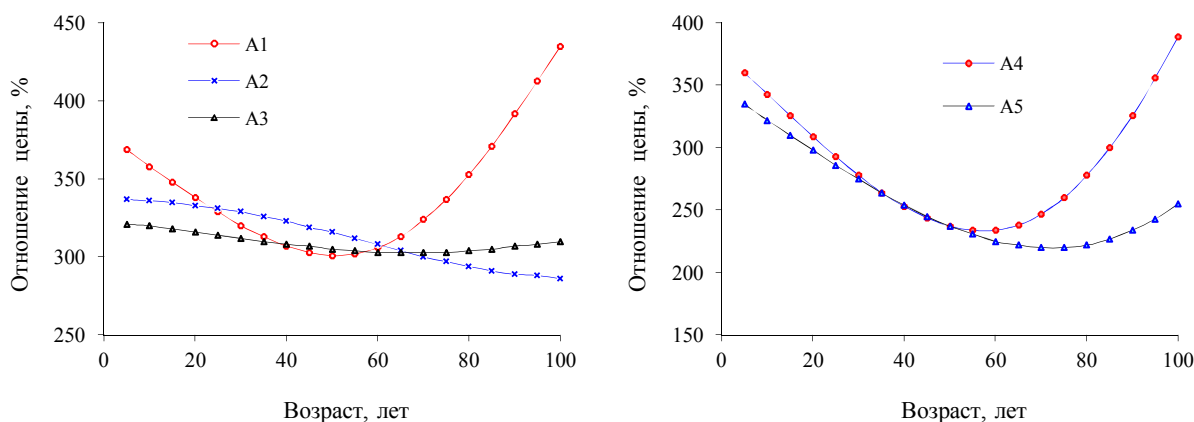


Рис. 6. Динамика отношения таксовой цены древесины сосняков к березнякам в борах Заволжья

### Выводы

1. В сосняках и березняках боров Марийского Заволжья запас стволовой древесины, её наличная масса и таксовая цена увеличиваются с возрастом лишь до определённого момента времени, а затем неуклонно снижаются, что связано с преобладанием процесса отпада деревьев над процессом их роста. Динамику этих таксационных показателей наилучшим образом аппроксимирует куполообразная функция оптимума  $Y = 100 \times X / (a \times X^2 - b \times X + c)$ , значения параметров которой специфичны для каждой древесной породы и разных гигротопов.

2. Возраст наступления кульминации наличного запаса стволовой древесины, её массы и таксовой цены, а также их значения специфичны для каждой древесной породы и разных гигротопов. В древостоях с преобладанием берёзы кульминация этих таксационных показателей наступает раньше, однако, их величина в этот момент оказывается намного ниже. Размах величины запаса между гигротопами достигает  $135 \text{ м}^3/\text{га}$ , а абсолютно сухой массы стволовой древесины –  $55,3 \text{ т}/\text{га}$ . Наиболее велика разница между древостоями сосны и берёзы в сухих и заболоченных борах, где условия для их произрастания наиболее экстремальны.

3. Березняки в борах Марийского Заволжья превышают по высоте сосняки. Особенно велики различия в возрасте 20–30 лет.

4. Характер роста древостоев по высоте и диаметру в определённой мере зависит от их полноты, влияние которой в

разных гигротопов часто диаметрально противоположно, хотя в целом её возрастание приводит к более раннему наступлению кульминации текущего годового прироста, увеличению средней высоты древостоев и снижению их среднего диаметра.

5. Возраст технической спелости древостоев, при котором величина среднего годового прироста таксовой цены древесины максимальна, наступает в древостоях с преобладанием сосны в свежих и влажных борах Марийского Заволжья в 65–70 лет, в сухих – в 75, в сырых – в 90, в заболоченных – в 120. В березняках, произрастающих в свежих и влажных борах, он существенно не отличается от сосняков, в сухих же наступает раньше на 15, в сырых – на 25, а в заболоченных даже на 35 – 40 лет.

6. В борах Марийского Заволжья целесообразнее выращивать сосняки, которые по экономическим и экологическим критериям значительно превосходят здесь березняки.

7. Модели динамики продуктивности древостоев, созданные на бонитетной основе, являются искусственными, неадекватно отражая реальную действительность. Их нельзя использовать на практике для познания закономерностей развития насаждений и решения задач по управлению ими. Целесообразнее же создавать модели на основе зональных или региональных типов лесорастительных условий, которые адекватно отражают реальную картину происходящих изменений.

### Список литературы

1. Burton P.J., Messier C.M., Smith D.W., Adamowicz W.L. (Editors). Towards Sustainable Management of the Boreal Forest. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. 2003, 1039 p.

2. Писаренко А. И., Страхов В. В. Лесное хозяйство России: от пользования к управлению. М.: ИД «Юриспруденция», 2004. 552 с.

3. Демаков Ю. П. Диагностика устойчивости лесных экосистем: методологические и методиче-

ские аспекты. Йошкар-Ола: Периодика Марий Эл, 2000. 415 с.

4. Карманова И. В. Математические методы изучения роста и продуктивности растений. М.: Наука, 1976. 223 с.

5. Кузьмичев В. В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука, 1977. 160 с.

6. Кузьмичев В. В. Закономерности динамики древостоев. Новосибирск: Наука, 2013. 208 с.

7. *Рогозин М. В., Разин Г.С.* Модели динамики и моделирование развития древостоев // Сибирский лесной журнал. 2015. № 2. С. 55-70.
8. *Свалов Н. Н.* Моделирование производительности древостоев и теория лесопользования. М.: Лесная промышленность, 1979. 216 с.
9. *Усольцев В. А.* Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с.
10. Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России / А.З. Швиденко, Д. Г. Щепашенко, С. Нильсон и др. // Лесное хозяйство. 2003. № 6. С. 34-38.
11. Plant Growth Modelling and Applications: The Increasing Importance of Plant Architecture in Growth Models / Thierry Fourcaud, Xiaopeng Zhang, Alexia Stokes et al. // Annals of Botany. 2008. Vol. 101. Issue 8. p. 1053–1063. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn050>
12. Plant Growth Modelling and Applications: The Increasing Importance of Plant Architecture in Growth Models / Fourcaud et al. // Annals of Botany 101: 1053–1063, 2008/ doi:10.1093/aob/mcn050, available online at [www.aob.oxfordjournals.org](http://www.aob.oxfordjournals.org)
13. *Jogiste K.* Productivity of mixed stands of Norway spruce and birch affected by population dynamics: a model analysis // Ecological Modelling. 1998. Vol. 106. Issue 1. Pages 77–91.
14. *Bartelink H.H.* Effects of stand composition and thinning in mixed-species forests: a modeling approach applied to Douglas-fir and beech // Tree Physiol. 2000. Vol. 20 (5–6). Pp. 399-406.
15. *Курнаев С. Ф.* Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 201 с.
16. Агроклиматические ресурсы Марийской АССР / Под ред. С.Ф. Гречканевой и К.И. Марченко. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 108 с.
17. *Демаков Ю. П., Козлова И. А.* Математические модели хода роста культур сосны для различных типов леса Марийского Заволжья // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2007. № 2. С. 83–91.
18. *Демаков Ю. П., Денисов С.А.* Сложение и динамика породного состава лесов в борах Марийского Заволжья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 3 (35). С. 37-48.
19. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики / Ю.П. Демаков, А.С. Пуряев, В.Л. Черных и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 2 (26). С. 19-36.
20. *Демаков Ю. П., Пуряев А.С., Мифтахов Т.Ф.* Экономический подход к выбору целевой древесной породы для лесовыращивания в Предкамье Республики Татарстан // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. № 4 (42). С. 20-27.
21. *Чистяков А.Р., Денисов А.К.* Типы леса Марийской АССР. Йошкар-Ола: Марийское книжное издательство, 1959. 75 с.

Статья поступила в редакцию 05.07.17.

#### Информация об авторах

*ДЕМАКОВ Юрий Петрович* – доктор биологических наук, профессор-консультант кафедры экологии, почвоведения и природопользования, Поволжский государственный технологический университет; главный научный сотрудник, Государственный заповедник «Большая Кокшага». Область научных интересов – экология, лесоведение, лесоводство и биогеоценология. Автор 300 публикаций, в том числе 11 монографий и учебных пособий.

*ИСАЕВ Александр Викторович* – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по науке, Государственный заповедник «Большая Кокшага». Область научных интересов – экология, биогеоценология, лесное почвоведение, охрана природы. Автор 50 публикаций, в том числе одной монографии.

*ДЕНИСОВ Сергей Александрович* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – лесоведение, лесоводство, лесная пирология. Автор 150 публикаций, в том числе пяти монографий.

UDC 630\*181 (470.343)

DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.12

**PRODUCTIVITY DYNAMICS OF STANDS IN CONIFEROUS FORESTS  
OF MARI TRANS-VOLGA REGION**

**Yu. P. Demakov<sup>1,2</sup>, A. V. Isaev<sup>2</sup>, S. A. Denisov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Volga State University of Technology,  
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation  
E-mail: [DemakovYP@volgatech.net](mailto:DemakovYP@volgatech.net)

<sup>2</sup>State nature reserve "Bolshaya Kokshaga",  
26, Voinov-Internatsionalistov St., Yoshkar-Ola, 424038, Russian Federation  
E-mail: [nauka\\_gpz@yolamail.ru](mailto:nauka_gpz@yolamail.ru)

**Keywords:** mathematic models; pine forests; dynamics; mean annual increment; forest site types.

**ABSTRACT**

**The relevance** is conditioned by the need in improvement of sustainability in management of ecological and resource potential of forests achieved with the use of mathematical models of dynamics of productivity of stands. The mathematical models are developed on the regional and typological basis. **The goal of the research** is to study the regularities of dynamics of productivity of stands in coniferous forests of Mari Trans-Volga region and to reflect them as mathematical models. The forests growing in various hygrotopes of pine forests were **the object of this research**. E-data base, containing the information about the stands of more than 78 000 stratum with the overall area of 385 184 ha, was the material to analyze. IT solution was used to achieve the targeted task. The IT solution was based on a system statistical analysis of digital information on a personal computer with the use of packages of conventional application software. **Results.** It is viable to grow pure pine forests in coniferous forests of Mari Trans-Volga region. Pine forests are wide spread and they surpass by far the stands with participation of other species by ecological and economical criteria. The stock of stem wood, its actual stock, and stumpage price increase with the age of stands up to a certain point of time only, then they progressively decline. The functional relation of optimum  $Y = 100 \times X / (a \times X^2 - b \times X + c)$ , the parameter values of which are unique for each wood species and various hygrotopes, approaches in the best way. In the stands, where the birch prevails, the high point of these valuation indices comes earlier but the value valuation indices is much lower at the moment. The difference between the stands of pine and birch in dry and bogged coniferous forests is very large. The age of technical maturity of stands when mean annual increment of list price for timber is maximum (stands where pine trees predominate) is 65-70 years in fairly moist and moist coniferous forests, 75 years - in dry coniferous forests, 90 years - in damp forests, 120 years - in bogged forests. The figures for birch groves, growing in fairly moist and moist coniferous forests, are much about the same as for pine forests, but there is some difference for the birch groves growing in dry, damp and bogged coniferous forests. Thus, the age of technical maturity of stands when mean annual increment of list price for timber is maximum (birch groves) is 50 years in dry coniferous forests, 65 years - in damp forests, and 80-85 years - in bogged forests. The nature of growth of stands in height and diameter depends to an extent on the density, the influence of which is often polar in different hygrotopes. Altogether, the growth of influence leads to earlier high point of current annual increment, increase of mean height of trees and decrease of their mean diameter. **Conclusion:** to study the regularities of growth of stands and to solve the managerial tasks, it is desirable to develop the mathematical models, based on the zone-typological basis, not the bonitet one. The revealed regularities of dynamics of productivity of stands confirmed the conclusions of other researchers in full. Besides, they significantly updated them with qualitative economic and ecological data.

**REFERENCES**

1. Burton P.J., Messier C.M., Smith, D.W., Adamowicz W.L. (Editors). 2003. *Towards Sustainable Management of the Boreal Forest*. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. 1039 p.
2. Pisarenko A. И., Strakhov V.V. *Lesnoe khozyaystvo Rossii: ot polzovaniya k upravleniu* [Russian Forestry: from Use to Management]. Moscow: ID "Urisprudentsiya", 2004. 552 p.
3. Demakov Yu. P. Diagnostika ustoychivosti lesnykh ekosistem: metodologicheskie i metodicheskie aspekty [Diagnostics of Sustainability of Forest Ecosystems: Methodological and Methodical Aspects]. Yoshkar-Ola: Periodika Mari El, 2000. 415 p.
4. Karmanova I. V. *Matematicheskie metody izucheniya rosta i produktivnosti rasteniy* [Mathematical Methods to Study the Growth and Productivity of Plants]. Moscow: Nauka, 1976. 223 p.
5. Kuzmichev V. V. *Zakonomernosti rosta drevostoev* [Regularities of Growth of Stands]. Novosibirsk: Nauka, 1977. 160 p.
6. Kuzmichev V. V. *Zakonomernosti dinamiki drevostoev* [Regularities of the Stands Dynamics]. Novosibirsk: Nauka, 2013. 208 p.

7. Rogozin M. V., Razin G.S. Modeli dinamiki i modelirovanie razvitiya drevostoev [The Models of Dynamics and Simulation of Development of Stands]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal]. 2015. No 2. P. 55-70.
8. Svalov N. N. *Modelirovanie proizvoditelnosti drevostoev i teoriya lesopolzovaniya* [Simulation of Productivity of Stands and Theory of Forest Management]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1979. 216 p.
9. Usoltsev V. A. *Modelirovanie struktury i dinamiki fitomassy drevostoev* [Simulation of Structure and Dynamics of Phytomass of Stands]. Krasnoyarsk: Izdatelstvo Krasnoyarskogo universiteta, 1985. 191 p.
10. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nilsson S., et al. Sistema modeley rosta i dinamiki produktivnosti lesov Rossii [A System of the Models of Growth and Dynamics Productivity in Russian Forests]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry]. 2003. No 6. P. 34-38.
11. Thierry Fourcaud, Xiaopeng Zhang, Alexia Stokes, Hans Lambers, Christian Korner. Plant Growth Modelling and Applications: The Increasing Importance of Plant Architecture in Growth Models. *Annals of Botany*. Volume 101, Issue 8, 2008, p. 1053–1063, <https://doi.org/10.1093/aob/mcn050>
12. Fourcaud et al. Plant Growth Modelling and Applications Plant Growth Modelling and Applications: The Increasing Importance of Plant Architecture in Growth Models. *Annals of Botany* 101: 1053–1063, 2008/ doi:10.1093/aob/mcn050, available online at [www.aob.oxfordjournals.org](http://www.aob.oxfordjournals.org)
13. Jogiste K. Productivity of mixed stands of Norway spruce and birch affected by population dynamics: a model analysis. *Ecological Modelling*. 1998. Vol. 106, Issue 1, Pages 77–91.
14. Bartelink H.H. Effects of stand composition and thinning in mixed-species forests: a modeling approach applied to Douglas-fir and beech. *Tree Physiology*. 2000. Vol. 20 (5\_6): P. 399-406.
15. Kurnaev S. F. *Lesorastitelnoe rayonirovanie SSSR* [Forest Site Zoning in the USSR]. Moscow: Nauka, 1973. 201 p.
16. *Agroklimaticheskie resursy Mariyskoy ASSR*. Pod red. S.F. Grechkanevoy i K.I. Marchenko [Agroclimatical Resources of Mari ASSR. Under the editorship of S.F. Grechkaneva and K.I. Marchenko]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 108 p.
17. Demakov Yu. P., Kozlova I. A. Matematicheskie modeli khoda rosta kultur sosny dlya razlichnykh tipov lesa Mariyskogo Zavolzhya [Mathematical Models of Growth Course of Planted Pines for Various Forest Types in Mari Trans-Volga Region]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Kazan State Agrarian University]. 2007. No 2. P. 83–91.
18. Demakov Yu. P., Denisov S.A. Slozhenie i dinamika porodnogo sostava lesov v borakh Mariyskogo Zavolzhya [Composition and Dynamics of Species in Coniferous Forests of Mari Trans-Volga Region]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Les. Ecologiya. Prirodopolzovanie* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2017. No 3 (35). P. 37-48.
19. Demakov Yu. P., Puryaev A.S., Chernykh V.L., et al. Ispolzovanie allometricheskikh zavisimostey dlya otsenki fitomassy razlichnykh fraktsiy derevev i modelirovaniya ikh dinamiki [Use of Allometric Dependences to Assess the Phytomass of Various Fractions of Trees and to Simulate Their Dynamics]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Les. Ecologiya. Prirodopolzovanie* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2015. No 2 (26). P. 19-36.
20. Demakov Yu. P., Puryaev A.S., Miftakhov T.F. Ekonomicheskiy podkhod k vyboru tselevoy drevesnoy porody dlya lesovyrashchivaniya v Predkame Respubliki Tatarstan [Economic Approach to the Choice of the Target-Oriented Wood Species to Cultivate in the Fore-Kama Region of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Kazan State Agrarian University.]. 2016. No 4 (42). P. 20-27.
21. Chistyakov A.R., Denisov A.K. Tipy lesa Mariyskoy ASSR [Forest Types in Mari ASSR.]. Yoshkar-Ola: Mariyskoe kn. izdatelstvo, 1959. 75 p.

The article was received 05.07.17.

**For citation:** Demakov Yu. P., Isaev A. V., Denisov S. A. Productivity Dynamics of Stands in Coniferous Forests of Mari Trans-Volga Region. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2017. No 4(36). Pp. 12–24. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.12

#### Information about the authors

*DEMAKOV Iurii Petrovich* – Doctor of Biological Sciences, Professor-Consultant of the Department of Forest Species and Forest Works Mechanization, Volga State University of Technology; Senior Researcher of the nature reserve «Bolshaya Kokshaga». Research interests – ecology, forest science, forestry, biogeocenology. Author of 300 publications including 11 monographs and students' manuals.

*ISAEV Aleksandr Viktorovich* – Candidate of Agricultural Sciences, Vice Head for Research at the State Nature Reserve «Bolshaya Kokshaga». Research interests – biogeocenology, forest soil science, nature preservation. Author of 55 publications including 1 monograph.

*DENISOV Sergey Aleksandrovich* – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Sylviculture and Forest Management, Volga State University of Technology. Research interests – sylviculture, forest management, forest pyrology. Author of 150 publications.