



УДК 630\*231

**В.А. Усольцев, А.А. Маленко, В.А. Азарёнок**  
**V.A. Usoltsev, A.A. Malenko, V.A. Azarenok**

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ЕЛОВО-ПИХТОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ЕВРАЗИИ

### BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF *PICEA-ABIES* FORESTS IN EURASIA'S CLIMATIC GRADIENTS

**Ключевые слова:** фитомасса насаждений, фракции фитомассы, регрессионные модели, морфометрические показатели, зональные пояса, индекс континентальности, климатически обусловленные градиенты.

Установлено, что по зональному градиенту фитомасса елово-пихтовых насаждений монотонно возрастает с выходом на плато в направлении от северной к южной оконечности материка, а в пределах одного зонального пояса последовательно снижается в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности в Якутии. Фитомасса нижнего яруса имеет минимальные значения в северном умеренном поясе, увеличиваясь в северном и южном направлениях. В пределах одного зонального пояса по мере приближения к полюсу континентальности фитомасса елово-пихтарников непрерывно возрастает. Отношение подземной фитомассы к надземной по зональному градиенту в направлении с севера на юг снижается. Аналогичное снижение происходит в пределах одного зонального пояса в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности. Отношение фитомассы нижнего яруса к массе древесного яруса наибольшее в субарктическом поясе, резко снижается в северном умеренном поясе, постепенно увеличиваясь в направлении к субэкваториальному поясу. В пределах одного зонального пояса названное соотношение последовательно возрастает в направлении к полюсу континентальности. Изложенные закономерности получены впервые и имеют предварительный характер: по мере дальнейшего наполнения базы фактических данных о фитомассе насаждений, применения более совершенных расчётных алго-

ритмов и в связи с изменением климата они могут быть подвержены смещениям.

**Keywords:** forest biomass, biomass compartments, regression models, morphometric indices, zonal belts, index of climate continentality, climatically-related gradients.

It is found that biomass of spruce-fir forests increases monotonically according to zonal (natural) gradient with the exit to the plateau in the direction from the northern to the southern tip of Eurasia, and consistently reduced in the direction from the Atlantic and Pacific coasts to the continentality pole in Yakutia within a single zonal belt. Understory biomass has minimal value in the northern temperate zone, increasing in both northern and southern directions. Within a single zonal belt spruce-fir forest biomass continuously increases when approaching the pole of climate continentality. The ratio of underground biomass to aboveground one (root:shoot ratio) is reduced on zonal gradient from north to south. A similar decline occurs in the direction from the Atlantic and Pacific coasts to the pole of climate continentality within a single zonal belt. The ratio of understory biomass to total wood one is maximum in the subarctic zone, it dramatically reduces in the northern temperate zone, gradually increasing in the direction to the subequatorial belt. Within a single zonal belt the same ratio increases sequentially towards the pole of continentality. The regularities reported are obtained for the first time and are of a preliminary nature: as filling the database of forest biomass, using more sophisticated computational algorithms and due to climate change, they may be subject to changes.

**Усольцев Владимир Андреевич**, д.с.-х.н., проф., Засл. лесовод России, Уральский государственный лесотехнический университет; гл. н.с., Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург. Тел.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

**Usoltsev Vladimir Andreyevich**, Dr. Agr. Sci., Prof., Ural State Forestry Engineering University; Chief Staff Scientist, Botanical Garden, Ural Branch, Rus. Acad. of Sci., Yekaterinburg. Ph.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

**Маленко Александр Анатольевич**, д.с.-х.н., зав. каф. лесного хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru

**Азарёнок Василий Андреевич**, д.с.-х.н., проф., Уральский государственный лесотехнический университет. E-mail: v.azarenok@yandex.ru.

**Malenko Aleksandr Anatolyevich**, Dr. Agr. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Forestry, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru.

**Azarenok Vasily Andreyevich**, Dr. Agr. Sci., Prof., Ural State Forest Engineering University. E-mail: v.azarenok@yandex.ru.

### Введение

Данные о биологической продуктивности лесов имеют первоочередное значение для оценки их роли в глобальных биосферных циклах. А.И. Уткин рассматривает изучение биологической продуктивности экосистем как основополагающее экологическое направление прошлого столетия и как предтечу и составную часть современного научного направления – углеродный цикл биосферы [1]. Любой исследователь биологической продуктивности лесов, прежде всего, сталкивается с чрезвычайно высокой сложностью их структуры: наличие многоярусности полога, дифференциация ассимиляционного аппарата по его профилю, хаотичность архитектоники кроны и соотношения древесины и коры в ней, неуловимая мозаика нижних ярусов. Тем не менее Р. Уиттекер и П. Маркс исследователям биологической продуктивности лесов предлагают руководствоваться следующим исходным тезисом: «Очевидная сложность, по степени которой лес не имеет себе равных среди растительных сообществ, представляет собой не непреодолимое препятствие, а благоприятную возможность производить в нем измерения таким образом, чтобы получить сведения о его функциональном дизайне, а также оценку его биологической продуктивности, наиболее точную по сравнению с любым иным способом» [2].

Известно, что размеры продуцирования органического вещества находятся в зависимости от гидротермических условий климата отдельных регионов [3], и для Евразии составлены карты-схемы продуктивности «обезличенного» растительного покрова на основе различных климатических индексов, гидротермических показателей и типов растительности [4].

В исследовании поставлена задача установления географических закономерностей в изменении фитомассы не обезличенного лесного покрова Евразии, а елово-пихтовых насаждений, занимающих значительную территорию Евразии. При этом необходимо определиться с некоторыми ограничениями и начальными условиями:

- исследуемая территория должна быть представлена, как минимум, на уровне континента, поскольку на региональных уровнях продуктивность лесных экосистем определяется совокупностью многих экзо- и эндогенных факторов, привести которые в систему практически невозможно;

- на всю исследуемую территорию должны иметься в наличии карты-схемы распределения основных климатических показателей, определяющих продуктивность лесного покрова;

- необходимо наличие репрезентативной базы данных о показателях фитомассы насаждений, полученных на пробных площадях; методическими указаниями к Международной биологической программе рекомендовалось закладывать пробные площадки в типичных «фоновых» местообитаниях, репрезентативных по отношению к данному типу растительных сообществ [5]. Если считать наши пробные площадки репрезентативными, то на их основе можно сделать предварительный анализ трансконтинентальных изменений фитомассы лесобразующих пород в градиентах климатических показателей;

- невозможно произрастание одного и того же вида на всей территории Евразии, и ареалы замещающих, или викарирующих, видов [6] в пределах рода приурочены к определенным экорегионам.

Основными климатическими факторами, определяющими структуру и продуктивность лесного покрова, являются количество приходящей фотосинтетически активной радиации (ФАР) и влагообеспеченность местообитаний. Первый из них определяет природную зональность лесного покрова, а второй в значительной степени связан с континентальностью климата, т.е. с удаленностью от атлантического и тихоокеанского побережий [7, 8].

### Объекты и методы исследования

Известно, что темнохвойные леса бореальной зоны в значительной степени представлены смешанными елово-пихтовыми древостоями: ель и пихта обычно растут совместно с преобладанием той или другой породы. Специальным сравнительным исследованием ельников с примесью пихты (с долей участия ели от 60 до 90%) и пихтарников с примесью ели (с долей участия пихты от 60 до 90%) в условиях Урала не выявлено статистически значимого различия биологической продуктивности тех и других в возрастном диапазоне от 20 до 130 лет [9]. С учетом сказанного в ходе исследования сформирована единая база данных о фитомассе насаждений ели и пихты как с преобладанием той или другой из названных пород, так и чистых ельников и пихтарников (табл. 1).

**Распределение количества пробных площадей с определениями фитомассы елово-пихтарников по видам и странам, т/га**

Преобладающий вид	Систематическое название	Страна	Количество пробных площадей
Ель европейская	<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.	Австрия, Белоруссия, Бельгия, Болгария, Германия, Дания, Италия, Латвия, Литва, Норвегия, Россия, Словакия, Украина, Финляндия, Франция, Чехия, Швеция, Эстония, Япония	554
Е. аянская	<i>P. jezoensis</i> (S.&Z.) Carrinr	Китай, Россия	190
Е. сибирская	<i>P. obovata</i> L.	Россия	144
Е. Шренка	<i>P. schrenkiana</i> F. & C.A.Mey.	Казахстан, Китай	58
Е. ситхинская	<i>P. sitchensis</i> (Bong.) Carriire	Великобритания, Ирландия	12
Е. пурпурная	<i>P. purpurea</i> Masters	Китай	4
Е. восточная	<i>P. orientalis</i> Link	Грузия, Россия	4
Е. корейская	<i>P. koraiensis</i> Nakai	Япония	2
Пихта сибирская	<i>Abies sibirica</i> L.	Россия	143
П. китайская колючая	<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	Китай	97
П. европейская	<i>A. alba</i> Mill.	Италия, Румыния, Украина	65
П. Вича	<i>A. veitchii</i> Lindl.	Япония	28
П. белокожая	<i>A. nephrolepis</i> (Trautv.) Maxim.	Россия	12
П. сильная	<i>A. firma</i> Sieb. et Zucc.	Япония	11
П. сахалинская	<i>A. sachalinensis</i> (Schmidt.) Mast.	Япония	8
П. замечательная	<i>A. spectabilis</i> (D.Don) Mirb.	Непал	6
П. кавказская	<i>A. nordmanniana</i> (Steven) Spach.	Россия	5
Итого			1343

Сформированная база данных о фитомассе елово-пихтарников Евразии состоит из 1343 определений на пробных площадях, в том числе 770 – в насаждениях с преобладанием ели и 373 – в насаждениях с преобладанием пихты [10]. На республики бывшего СССР приходится 776 пробных площадей (около 58%), в том числе на Россию – 565 (около 42%).

Поскольку совокупность показателей биопродуктивности в пределах региона сильно варьирует в связи с различиями возраста, добротности произрастания и морфологии полога, для обеспечения корректности сопоставлений в пределах географического градиента анализируются не обобщенные совокупности определений фитомассы на пробных площадях, а многофакторные уравнения, объясняющие изменчивость фитомассы посредством включенных в них некоторых независимых переменных.

Материалы пробных площадей, представленные в таблице 1, объединены для ели и пихты в один исходный массив, структурированный в географическом плане. Фактические значения фитомассы 1343 елово-

пихтовых насаждений соотнесены с пятью климатическими (зональными) поясами (рис. 1), а также с индексами континентальности территории Евразии по С.П. Хромову [11] (рис. 2), путем нанесения координат каждой пробной площади на упомянутые карты-схемы.

По массиву исходных данных выполнен многофакторный регрессионный анализ климатической ординации запаса стволовой древесины и фитомассы елово-пихтовых насаждений согласно рекурсивной системе уравнений:

$$N = f(A, Zon, IC) \rightarrow M = f(A, N, Zon, IC) \rightarrow P_i = f(A, N, M, Zon, IC), \quad (1)$$

где  $N$  – число стволов, тыс. экз/га;

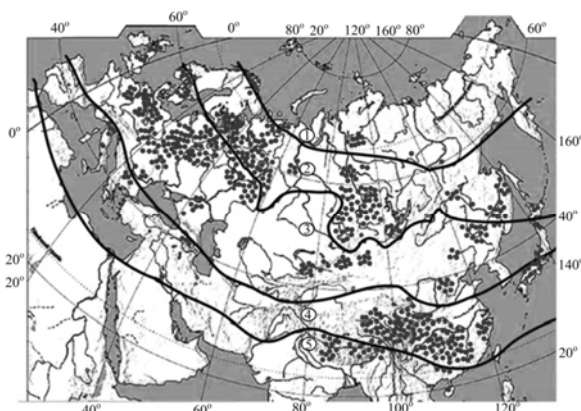
$A$  – возраст древостоя, лет;

$M$  – запас стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га;

$P_i$  – фитомасса в абсолютно сухом состоянии стволов с корой, скелета ветвей, хвои, корней, надземная, общая и нижнего яруса растительности, в который включены живой напочвенный покров, подлесок и подрост (соответственно,  $P_{St}$ ,  $P_{Bt}$ ,  $P_{Ft}$ ,  $P_R$ ,  $P_{At}$ ,  $P_T$  и  $P_U$ ), т/га;

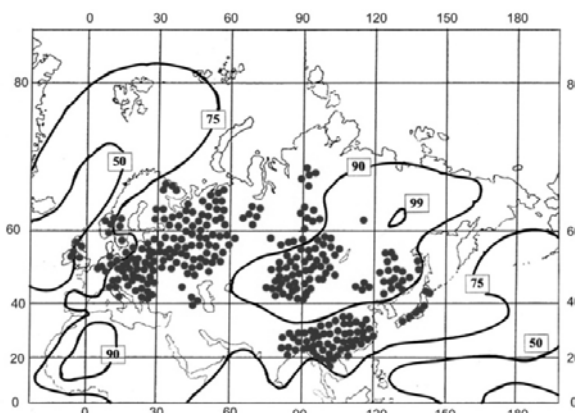
Zon – номер зонального пояса: 1, 2, 3, 4 и 5, соответственно, субарктический, северный умеренный, южный умеренный, субтропический и субэкваториальный;

IC – индекс континентальности климата по С.П. Хромову, %.



**Рис. 1. Распределение пробных площадей, на которых определена фитомасса елово-пихтовых насаждений (т/га), по зональным поясам: 1 – субарктический; 2 – северный умеренный; 3 – южный умеренный; 4 – субтропический; 5 – субэкваториальный [4, 12]**

таблицы взяты значения искомым показателей для возраста 100 лет и представлены в виде графиков их связи как с зональностью территории, так и с континентальностью ее климата (рис. 3, 4).



**Рис. 2. Карта-схема изолиний континентальности климата Евразии [11] с нанесенным положением пробных площадей, на которых выполнено определение фитомассы сосновых насаждений, т/га**

**Результаты и их обсуждение**

Характеристика полученных уравнений приведена в таблице 2.

Уравнения таблицы 2 протабулированы в последовательности, показанной стрелками, по задаваемым значениям возраста в диапазоне от 10 до 200 лет. Из полученной

Согласно полученным результатам масса хвои и ветвей елово-пихтарников изменяется по колоколообразной кривой с максимумом в 3-м зональном поясе (рис. 3 а, б), а масса стволов и корней, надземная и общая фитомасса монотонно возрастает в направлении от 1-го к 5-му зональным поясам (рис. 3 в, г, д, е).

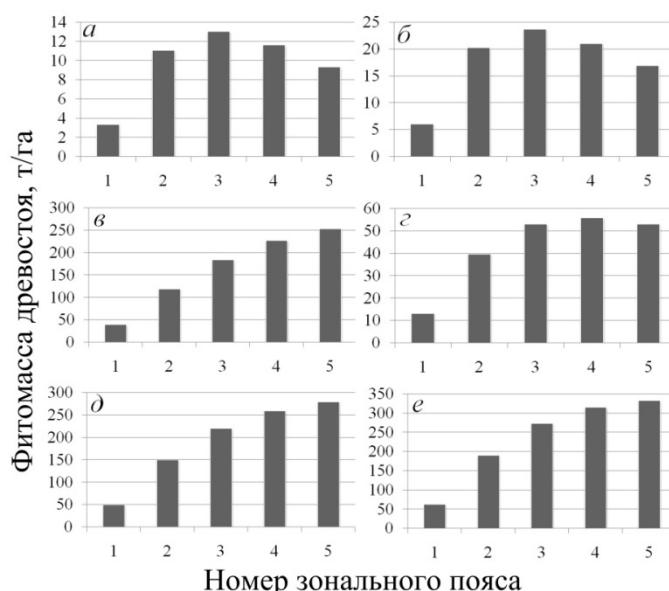
**Таблица 2**

**Характеристика уравнений (1) для елово-пихтовых насаждений Евразии**

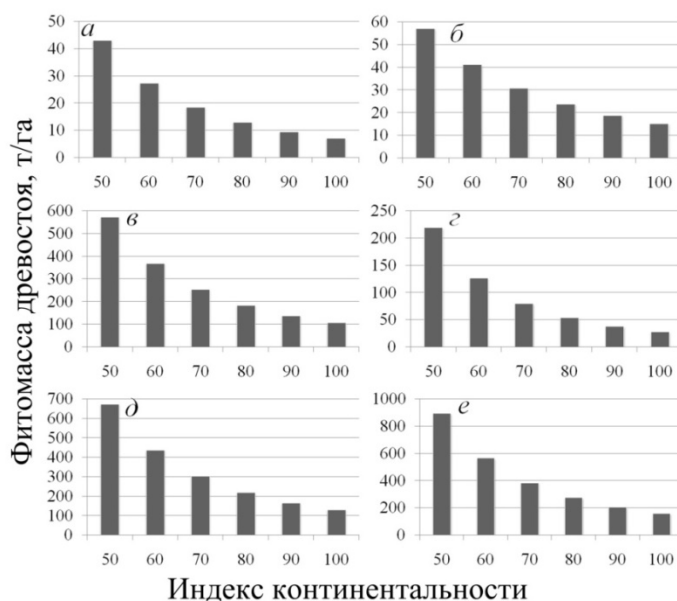
Зависимые переменные	Константы и независимые переменные					
	$a_0$	$a_1 (\ln A)$	$a_2 (\ln A)^2$	$a_3 (\ln N)$	$a_4 (\ln N)^2$	$a_5 (\ln M)$
$\ln (N)$	4,5618	-1,7526	0,1043	-	-	-
$\ln (M)$	1,6064	4,8673	-0,5070	-0,0513	-	-
$\ln (P_S)$	0,2418	0,4991	-0,0496	0,0431	-	0,9646
$\ln (P_B)$	2,2327	0,0704	-	0,1403	-0,0163	1,1627
$\ln (P_F)$	6,9741	-0,0546	-	0,2155	-0,0183	0,8913
$\ln (P_R)$	4,2332	0,2097	-	0,1234	-	0,8063
$\ln (P_A)$	3,2649	0,0645	-	0,0502	-	0,9736
$\ln (P_T)$	3,8273	0,0996	-	0,0434	-	0,9758
$\ln (P_U)$	-9,0813	-3,5192	0,4513	0,0877	-	0,1648

**Продолжение табл. 2**

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные				R <sup>2</sup>	SE
	$a_6 (\ln M)^2$	$a_7 \ln (Zon)$	$a_8 (\ln Zon)^2$	$a_9 \ln (IC)$		
$\ln (N)$	-	-0,5658	-	0,3627	0,555	0,58
$\ln (M)$	-	1,9093	-0,4083	-1,9991	0,654	0,54
$\ln (P_S)$	-	0,0955	-0,0896	-0,4966	0,984	0,16
$\ln (P_B)$	-0,0574	1,5001	-0,9012	-1,1131	0,848	0,39
$\ln (P_F)$	-0,0433	1,7634	-0,9477	-1,9892	0,735	0,43
$\ln (P_R)$	-	0,6548	-0,4630	-1,4362	0,910	0,37
$\ln (P_A)$	-0,0148	0,5686	-0,3352	-0,8642	0,972	0,18
$\ln (P_T)$	-0,0181	0,7007	-0,4200	-0,9630	0,974	0,20
$\ln (P_U)$	-	-3,2494	2,0896	3,7656	0,397	0,63



**Рис. 3.** Изменение расчетных показателей фитомассы елово-пихтарников, т/га: хвои (а), ветвей (б), стволов (в), корней (г), надземной (д) и общей (е) в возрасте 100 лет по климатическим поясам при индексе континентальности климата по С.П. Хромову, равном 80%

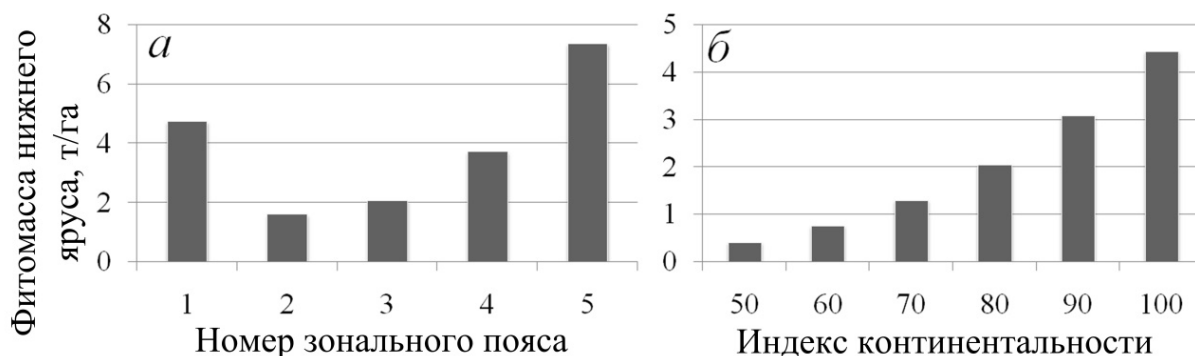


**Рис. 4.** Изменение расчетных показателей фитомассы елово-пихтарников, т/га: хвои (а), ветвей (б), стволов (в), корней (г), надземной (д) и общей (е) в возрасте 100 лет с индексом континентальности, по С.П. Хромову, в южном умеренном климатическом поясе (номер 3 на рис. 1)

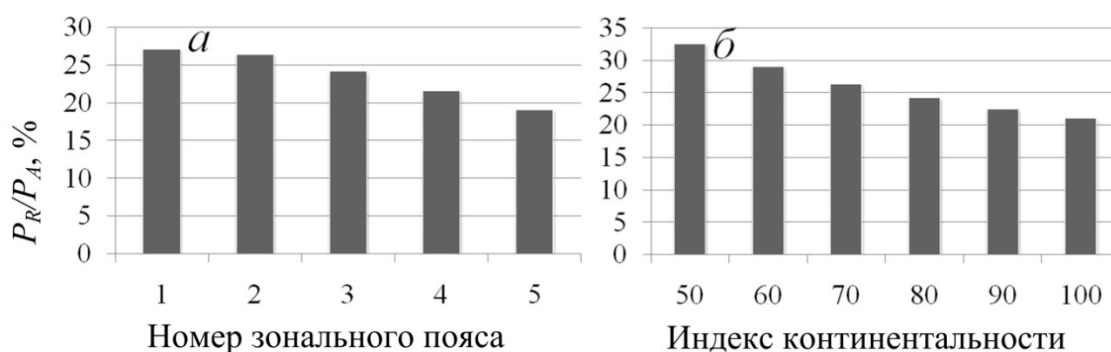
При фиксированном зональном поясе (пояс 3) все фракции фитомассы и её совокупные показатели в елово-пихтарниках монотонно снижаются в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности в Якутии (рис. 4).

Фитомасса нижнего яруса возрастает в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности в Якутии (рис. 5б). Минимальная фитомасса нижнего яруса приходится на 2-й зональный пояс (северный умеренный) и увеличивается в направлении субарктического и субэкваториального поясов (рис. 5а).

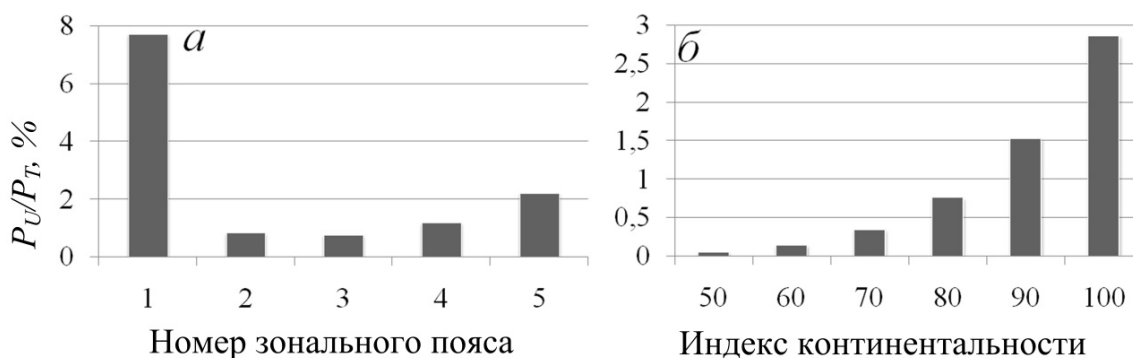
Отношение подземной фитомассы к надземной ( $P_R/P_A$ ) снижается как в направлении от субарктического к субэкваториальному поясу, так и в направлении полюса континентальности климата (рис. 6). Отношение фитомассы нижнего яруса к общей фитомассе древостоя снижается в направлении от субарктического пояса к умеренному и затем увеличивается вплоть до субэкваториального пояса, а в направлении от океанических побережий к полюсу континентальности монотонно возрастает (рис. 7).



**Рис. 5.** Связь расчетных показателей фитомассы нижнего яруса в возрасте 100 лет с зональной принадлежностью елово-пихтарников при индексе континентальности климата, равном 80% (а), и с индексом континентальности, по С.П. Хромову, в южном умеренном климатическом поясе (б)



**Рис. 6.** Изменение отношения  $P_R/P_A$  в 100-летних елово-пихтарниках в связи с номером зонального пояса при индексе континентальности, по С.П. Хромову, равном 80% (а), и с индексом континентальности, по С.П. Хромову, в южном умеренном климатическом поясе (б)



**Рис. 7.** Изменение отношения  $P_U/P_T$  в 100-летних елово-пихтарниках в связи с номером зонального пояса при индексе континентальности, равном 80% (а), и с индексом континентальности, по С.П. Хромову, в южном умеренном климатическом поясе (б)

**Заключение**

Таким образом, впервые для елово-пихтовых насаждений, произрастающих на территории Евразии, получены закономерности распределения фракционного состава фитомассы, а также отношения подземной

фитомассы к надземной и соотношения фитомассы нижнего и древесного ярусов в двух климатически обусловленных градиентах – природной зональности и континентальности климата.

## Библиографический список

1. Уткин А.И. Изучение пулов и потоков углерода на уровнях экосистемы и территориального комплекса // Стационарные лесоэкологические исследования: методы, итоги, перспективы: матер. и тез. докладов. – Сыктывкар, 2003. – С. 9-12.
2. Whittaker R.H., Marks P.L. Methods of assessing terrestrial productivity. In: Lieth H., Whittaker R.H. (eds.). Primary productivity of the biosphere. – New York: Springer, 1975. – P. 55-118.
3. Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов: методы изучения и результаты // Лесоведение и лесоводство: итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1975. – Т. 1. – С. 9-189.
4. Базилевич Н.И., Родин Л.Е. Карто-схемы продуктивности и биологического круговорота главнейших типов растительности суши // Изв. ВГО. – 1967. – Т. 99. – № 3. – С. 190-194.
5. Программа-минимум по определению первичной биологической продуктивности наземных растительных сообществ (проект) // Растительные ресурсы. – 1967. – Т. 3. – Вып. 4. – С. 612-620.
6. Толмачев А.И. Основы учения об ареалах: введение в хорологию растений. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1962. – 100 с.
7. Комаров В.Л. Меридиональная зональность организмов // Дневник I Всероссийского съезда русских ботаников в Петрограде. – Петроград, 1921. – Вып. 3. – С. 27-28.
8. Лавренко Е.М., Андреев В.Н., Леонтьев В.Л. Профиль продуктивности наземной части природного растительного покрова СССР от тундр к пустыням // Ботан. журнал. – 1955. – Т. 40. – № 3. – С. 415-419.
9. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. – 365 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/458>).
10. Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and reharmonized. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).
11. Хромов С.П. К вопросу о континентальности климата // Известия Всесоюзного географического общества. – 1957. – Т. 89. – № 3. – С. 221-225.
12. Алисов Б.П., Полтараус Б.В. Климатология. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 300 с.

## References

1. Utkin A.I. Izuchenie pulov i potokov ugleroda na urovnyakh ekosistemy i territorial'nogo kompleksa // Statsionarnye lesoekologicheskie issledovaniya: metody, itogi, perspektivy / Mater. i tezisy dokladov. – Syktyvkar, 2003. – S. 9-12.
2. Whittaker R.H., Marks P.L. Methods of assessing terrestrial productivity. In: Lieth H., Whittaker R.H. (eds.). Primary productivity of the biosphere. – New York: Springer, 1975. – P. 55-118.
3. Utkin A.I. Biologicheskaya produktivnost' lesov: Metody izucheniya i rezul'taty // Lesovedenie i lesovodstvo: Itogi nauki i tekhniki. – M.: VINITI, 1975. – T. 1. – S. 9-189.
4. Bazilevich N.I., Rodin L.E. Kartoskhemy produktivnosti i biologicheskogo krugovorota glavneishikh tipov rastitel'nosti суши // Izv. VGO. – 1967. – T. 99. – № 3. – S. 190-194.
5. Programma-minimum po opredeleniyu pervichnoi biologicheskoi produktivnosti nazemnykh rastitel'nykh soobshchestv (proekt) // Rastitel'nye resursy. – 1967. – T. 3. – Vyp. 4. – S. 612-620.
6. Tolmachev A.I. Osnovy ucheniya ob arealakh: Vvedenie v khorologiyu rastenii. – L.: Izd-vo LGU, 1962. – 100 s.
7. Komarov V.L. Meridional'naya zonal'nost' organizmov // Dnevnik I Vserossiiskogo s'ezda russkikh botanikov v Petrograde. – Vyp. 3. – Petrograd, 1921. – S. 27-28.
8. Lavrenko E.M., Andreev V.N., Leont'ev V.L. Profil' produktivnosti nadzemnoi chasti prirodnoho rastitel'nogo pokrova SSSR ot tundr k pustynyam // Botan. zhurn. – 1955. – T. 40. – № 3. – S. 415-419.
9. Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bergman I.E. Biologicheskaya produktivnost' lesov Urala v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya: Issledovanie sistemy svyazei i zakonomenostei. – Ekaterinburg: UGLTU, 2012. – 365 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/458>).
10. Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and reharmonized. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).
11. Khromov S.P. K voprosu o kontinental'nosti klimata // Izv. Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva. – 1957. – T. 89. – № 3. – S. 221-225.
12. Alisov B.P., Poltaraus B.V. Klimatologiya. – M.: Izd-vo MGU, 1974. – 300 s.

