Соотношение массы корней культур ели сибирской и вторичного лиственного древостоя как характеристика их конкурентных отношений в связи с рубками ухода на Среднем Урале

***Г.Г. Терехов**, к.с.-х.н, Ботанический сад УрО РАН;*
***В.А. Усольцев**, д.с-х.н., профессор, Уральский ГЛТУ;*
***А.И. Колтунова**, д.с-х.н., Оренбургский ГАУ*

В экологии растений наименее изучены их корневые системы. Имеется существенная диспропорция в степени изученности количественных характеристик листвы и корней древесных растений, несмотря на то, что корни в не меньшей степени, чем листва, определяют продукционный потенциал растения.

Изучению вертикально-фракционного распределения фитомассы лесного полога в качестве основы для его анализа как функционально дифференцированной фотосинтетической системы, обеспечивающей устойчивую динамику лесного биогеоценоза, в лесоведческой литературе уделено достаточно внимания. Детальный обзор результатов таких исследований дан в монографии сотрудников Института лесоведения РАН [1]. Менее изучена вертикально-фракционная структура фитомассы насаждений в подземной сфере, или в «подвалах биосферы» [2–5]. Исторически сложился подход, при котором масса корневой системы оценивается с учетом дифференциации составляющих ее корней по толщине. Корни обычно делятся на фракции с целью более точной оценки их участия в круговороте веществ и потоках энергии, поскольку продолжительность периода разложения (деструкции) обратно пропорциональна их толщине.

Цель наших исследований – изучение вертикально-фракционного распределения в толще почвогрунта массы и протяженности корней ели и конкурирующих с ней мелколиственных пород последующего возобновления после двух приемов рубок ухода в 30-летних культурах ели Починковского лесничества Билимбаевского лесхоза Свердловской области.

Характеристика лесокультурной площади. Опытно-производственный участок площадью 8,6 га заложен в 1977 г. на вырубке 10-летней давности в типе леса ельник травяной в кв. 43. Участок приурочен к верхней 1/3 макросклона юго-западной экспозиции с уклоном до 5°. Почва на участке свежая дерново-слабоподзолистая суглинистая на элювии осадочных пород.

Почва обрабатывалась плугом ПКЛ-70, с помощью которого нарезалась борозда и двойным встречным проходом отдельно напахивались пласты. Глубина борозд 10–15 см; толщина пластов около 20 см, ширина их – 35–40 см. Размещение борозд и пластов – с востока на запад, расстояние между осями борозд около 5 м. Посадка выполнена вручную 3-летними сеянцами ели сибирской по дну борозд и в один пласт. За культурами ели проведено 3 агротехнических и 2 лесоводственных ухода: осветление коридорным методом в 8-летних, прочистка комбинированным методом – в 15-летних культурах ели. Осветление выполнено на всей территории участка, прочистка – на одной части территории, а вторая оставлена в качестве контрольного варианта, где ель затенялась лиственными породами последующего возобновления.

Методика исследований. Исследования выполнены на трех пробных площадях, заложенных культурах ели соответственно по трем вариантам:

- культуры на открытом месте с минимальной степенью затенения кроны единичными деревьями лиственных пород (состав древостоя 10 Е ед. Б), заложенные по пластам (вариант 1);
- то же (состав 10 Е ед.Б), заложенные по дну борозд (вариант 2);
- культуры, сформировавшиеся под пологом березы и осины (состав 4Е4Б2Ос), заложенные по дну борозд (вариант 3).

Подбор вариантов выполнен в предположении, что первые два позволят выявить влияние на морфоструктуру и корненасыщенность эдафических условий ели (пласты и дно борозд) в чистых культурах, а вторые два – влияние различной степени угнетения ели вторичным мелколиственным древостоем в одних и тех же эдафических условиях.

В каждом варианте взято по 6 модельных деревьев. Протяженность скелетных корней (горизонтальную проекцию корневой системы) определяли методу А.Ф. Чмыра [6]. У каждого дерева в обе стороны от ряда раскапывали по три скелетных корня, вдоль ряда – по одному-двум корням. Корненасыщенность почвенных слоев изучали согласно методическим указаниям В.А. Колесникова (1972) и П.К. Красильникова [7–8]. Проводящие корни древесно-кустарниковых пород толщиной более 1 мм различали по цвету, например, желтовато-коричневому у ели, красноватому – у березы, белесому – у осины, черному – у рябины и черники. Тонкие корни (< 1 мм) по цвету не различались и идентифицировались по их примыканию к проводящим корням.

Выделено три зоны последовательного удаления от оси ряда культур к середине междурядья. Для этого напротив модельных деревьев закладывали траншеи длинной стороной (2,2 м) вдоль междурядья на расстоянии 0,5; 1,5 и 2,5 м от оси ряда культур, обозначенных порядковыми номерами соответственно от 1 до 3. Ширина и глубина траншеи 0,5 м. Из стенки траншеи, ближней к ряду деревьев, отбирали 7 монолитов размером 25 20 см по каждому слою почвы: верхнему (0–10 см), среднему (10–20 см) и нижнему (20–30 см). Почву монолитов замачивали в полиэтиленовых емкостях и промывали через сита с ячейками – последовательно 2,0; 1,0 и 0,5 мм. Корни ели и лиственных пород разбирали и сортировали с помощью металлического шаблона по категориям крупности: мелкие – до 1 мм, средние – 1–3, крупные – 3–10 и очень крупные – 10–20 мм. Нижний срез последних выполняли на расстоянии 0,25 м от оси ствола. Затем корни взвешивали на лабораторных весах Shimadzu ELB-600 с точностью до 0,01 г и измеряли длину каждой их категории на миллиметровой бумаге. Все образцы высушивали в термостате до абсолютно сухого состояния при 100–105°С, после чего определяли коэффициенты содержания сухого вещества по категориям крупности.

Результаты исследований. Культуры ели, созданные по пластам, с первых лет имели преимущество по темпам роста по сравнению с культурами в бороздах вследствие лучших эдафических условий для ели. Это преимущество сохранялось и после осветлений, а в вариантах посадки по дну борозд к моменту проведения прочисток (к возрасту 15 лет) культуры оказались под пологом лиственных пород. В результате сформировался по существу сложный древостой с полнотой еловолиственного насаждения, превышающей нормативную. Высота ели по пластам превышала высоту деревьев по дну борозд в 1,4–2,2 раза.

Прочистка культур в значительной мере изменила экологические условия в насаждении. Прежде всего, повысились интенсивность и продолжительность освещенности большей части кроны деревьев и поверхности почвы, усилился приток солнечной радиации к нижним ярусам растительности и почвенным горизонтам, в вегетационный период возросла сумма эффективных температур.

К 30-летнему возрасту на участке сформировались два типа насаждений: одноярусные чистые еловые с единичным участием осины, березы, ивы козьей, рябины обыкновенной (около 65% территории участка), и двухъярусные лиственно-хвойные молодняки (4Е4Б2Ос), где ель находилась во втором ярусе под пологом лиственных пород. Таксационная характеристика древостоев в 30-летних культурах приведена в табл. 1.

К возрасту 30 лет из культур, созданных по пластам, почти повсеместно сформировался чистый еловый древостой (вариант 1). В культурах, созданных по дну борозд, чистый еловый древостой (вариант 2) и смешанный лиственно-хвойный молодняк (вариант 3) находились в соотношении соответственно 40 и 60%. В последнем случае ель росла под пологом лиственных пород (береза, осина, ива, рябина). Чем интенсивнее затенена ель, тем сильнее у нее выражено снижение прироста по всем морфометрическим показателям. Высота и диаметр ели на открытых местах при посадке в дно борозд (вариант 2) меньше соответствующих показателей ели при посадке ее в пласт (вариант 1) на 32–41%, а при посадке в дно борозд морфометрические показатели ели под пологом лиственных (вариант 3) ниже соответствующих значений ели на открытых местах (вариант 2) на 42–46% (табл. 1). В первом случае различия в морфоструктуре обусловлены разными эдафическими условиями в вариантах 1 и 2, а во втором – различной степенью угнетения ели вторичным мелколиственным древостоем в вариантах 2 и 3.

Наши экспериментальные данные о распределении массы и протяженности корней в еловолиственных культурценозах, сформировавшихся спустя 30 лет после посадки ели (табл. 2 и 3), дают возможность рассчитать долю корней мелколиственных в общей массе и длине корней культур-

1. Таксационная характеристика 30-летних культур ели

Вариант	Высота, м	Диаметр на высоте груди, см	Проекция кроны, м		Протяженность живой кроны, м	Продолжительность жизни хвои, лет	
			вдоль ряда	поперек ряда		на стволе	на ветвях
Посадка в пласт. Открытое место. Состав 10ЕедБ (вариант 1)	12,8±0,33	10,8±0,37	2,41±0,11	3,3±0,19	12,2±0,61	8	9
Посадка в дно борозд. Открытое место. Состав 10ЕедБ (вариант 2)	7,6±0,20	7,3±0,21	1,7±0,07	2,4±0,05	7,1±0,20	9	11
Посадка в дно борозд. Под пологом лиственных пород. Состав 4Е4Б2Ос (вариант 3)	4,1±0,14	4,2±0,13	1,7±0,06	1,9±0,09	3,8±0,15	8	10

2. Фитомасса корней по вертикальному профилю и категориям крупности у деревьев ели и лиственных пород в 30-летних культурах (экспериментальные данные)

Глубина почвенного слоя, см	Фитомасса корней ели (числитель) и лиственных пород (знаменатель)									
	тонкие (до 1 мм)		средние (1–3 мм)		крупные (3–10 мм)		очень крупные (10–16 мм)		всего	
	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%
Посадка в пласт. Открытое место. Состав 10ЕедБ (вариант 1)										
0–10	0,55±0,029 0,09±0,003	9 10	0,69±0,068 0,12±0,033	12 12	1,37±0,086 0,14±0,071	23 14	3,25±0,077 0,62±0,054	56 64	5,86±0,199 0,97±0,049	100 100
10–20	0,44±0,086 0,02±0,001	51 55	0,21±0,018 0,01 ±0,001	24 20	0,19±0,040 0,01±0,001	22 25	0,03±0,001 –	3 –	0,87±0,067 0,04±0,002	100 100
20–30	0,10±0,009 0,02±0,001	54 42	0,07±0,003 0,02±0,001	38 46	0,01±0,000 0,01±0,000	8 12	– –	– –	0,18±0,012 0,05±0,003	100 100
Итого 0–30	1,09±0,098 0,13±0,010	15 13	0,97±0,077 0,15±0,011	14 14	1,57±0,132 0,16±0,012	24 14	3,28±0,196 0,62±0,049	47 59	6,91±0,465 1,06±0,091	100 100
Посадка в дно борозды. Открытое место. Состав 10ЕедБ (вариант 2)										
0–10	0,29±0,017 0,39±0,024	18 28	0,36±0,019 0,45±0,038	23 32	0,44±0,029 0,41±0,028	28 29	0,49±0,033 0,14±0,009	31 11	1,58±0,149 1,39±0,133	100 100
10–20	0,23±0,016 0,15±0,012	21 22	0,23±0,021 0,19±0,014	21 28	0,54±0,041 0,31±0,019	50 45	0,09±0,007 0,04±0,003	8 5	1,09±0,087 0,69±0,071	100 100
20–30	0,20±0,016 0,09±0,007	59 37	0,10±0,009 0,08±0,009	29 35	0,04±0,003 0,07±0,006	12 28	– –	– –	0,34±0,028 0,24±0,019	100 100
Итого 0–30	0,72±0,046 0,63±0,065	24 27	0,69±0,055 0,72±0,063	23 31	1,02±0,101 0,79±0,066	34 34	0,58±0,045 0,18±0,006	19 8	3,01±0,261 2,32±0,209	100 100
Посадка в дно борозды. Ель под пологом. Состав 4Е4Б2Ос (вариант 3)										
0–10	0,18±0,016 0,83±0,079	23 13	0,25±0,018 1,21±0,108	32 18	0,36±0,029 1,29±0,121	45 20	– 3,26±0,287	– 49	0,79±0,068 6,59±0,601	100 100
10–20	0,05±0,004 0,51±0,044	21 5	0,11±0,010 0,98±0,079	46 9	0,08±0,006 2,77±0,236	33 27	– 6,05±0,546	– 59	0,24±0,021 10,31±0,988	100 100
20–30	0,02±0,002 0,24±0,016	19 17	0,04±0,003 0,43±0,031	48 30	0,03±0,002 0,65±0,056	33 44	– 0,13±0,012	– 9	0,09±0,007 1,45±0,131	100
Итого 0–30	0,25±0,021 1,57±0,146	22 9	0,40±0,028 2,62±0,243	36 14	0,47±0,039 4,71±0,386	42 26	– 9,44±0,894	– 51	1,12±0,109 18,34±1,352	100 100

3. Длина корней по вертикальному профилю и по категориям крупности у ели и лиственных пород в 30-летних культурах (экспериментальные данные)

Глубина почвенного слоя, см	Длина корней ели (числитель) и лиственных пород (знаменатель)									
	тонкие (до 1 мм)		средние (1 – 3 мм)		крупные (3 – 10 мм)		очень крупные (10 -16 мм)		всего	
	тыс. км /га	%	тыс. км /га	%	тыс. км /га	%	тыс. км /га	%	тыс. км /га	%
Посадка в пласт. Открытое место. Состав 10ЕедБ (вариант 1)										
0–10	5,27±0,466 0,88±0,073	84 83	0,77±0,064 0,14±0,008	12 14	0,18±0,013 0,02±0,009	3 2	0,04±0,003 0,01±0,001	1 1	6,26±0,591 1,05±0,094	100 100
10–20	4,23±0,386 0,21±0,014	96 91	0,12±0,011 0,02±0,001	3 9	0,03±0,003 –	1 –	– –	– –	4,38±0,386 0,23±0,016	100 100
20–30	0,92±0,076 0,19±0,018	92 85	0,08±0,006 0,03±0,001	8 14	0,004±0,0003 0,002±0,0001	– 1	– –	– –	1,004±0,0840 0,222±0,0201	100 100
Итого 0–30	10,42±0,846 1,28±0,121	89 85	0,97±0,084 0,19±0,014	8 13	0,21±0,015 0,02±0,009	2 1	0,04±0,003 0,01±0,001	1 1	11,64±0,986 1,48±0,013	100 100
Посадка в дно борозды. Открытое место. Состав 10ЕедБ (вариант 2)										
0–10	2,79±0,263 3,72±0,316	85 89	0,42±0,038 0,44±0,031	13 10	0,08±0,006 0,04±0,003	2 1	0,006±0,0004 0,002±0,0001	– –	3,296±0,2961 4,202±0,3792	100 100
10–20	2,22±0,192 1,43±0,123	87 87	0,27±0,021 0,18±0,036	10 11	0,08±0,06 0,03±0,001	3 2	0,006±0,0003 0,001±0,0001	– –	2,576±0,2011 1,641±0,3851	100 100
20–30	1,91±0,146 0,85±0,077	95 91	0,10±0,008 0,08±0,003	5 9	0,01±0,001 0,01±0,001	– –	– –	– –	2,01±0,169 0,94±0,026	100 100
Итого 0–30	6,92±0,514 6,00±0,501	88 89	0,79±0,068 0,70±0,053	10 10	0,17±0,008 0,08±0,003	2 1	0,012±0,0001 0,003±0,0001	– –	7,892±0,5451 6,783±0,6011	100 100
Посадка в дно борозды. Ель под пологом. Состав 4Е4Б2Ос (вариант 3)										
0–10	1,74±0,139 7,94±0,696	80 87	0,30±0,027 0,96±0,049	14 11	0,13±0,006 0,15±0,001	6 1	– 0,03±0,001	– 1	2,17±0,189 9,08±0,739	100 100
10–20	0,46±0,023 4,87±0,396	79 80	0,10±0,006 0,84±0,063	18 14	0,02±0,001 0,30±0,009	3 5	– 0,06±0,002	1 –	0,58±0,039 6,07±0,496	100 100
20–30	0,18±0,003 2,28±0,097	79 85	0,04±0,001 0,31±0,026	18 11	0,01±0,0005 0,08±0,004	3 4	– –	– –	0,23±0,013 2,67±0,187	100 100
Итого 0–30	2,38±0,161 15,09±1,089	80 85	0,44±0,029 2,11±0,155	15 12	0,16±0,004 0,53±0,022	5 2	– 0,09±0,003	– 1	2,98±0,192 17,82±1,409	100 100

ценоза, которая на количественном уровне характеризует степень подавления деревьев ели в культурах мелколиственными породами. Результаты такого расчета приведены в табл. 4. Аналитически описать изменение доли мелколиственных пород в общей массе корней по вариантам формирования культурценозов, представленное в табл. 4, можно с помощью уравнения общего вида:

$$Pro = f(d_i, h_j), \quad (1)$$

где *Pro* – доля лиственных в общей массе корней культурценоза, %;

d_i – верхнее значение толщины корней в пределах *i*-й градации, мм (например, $d_i = 1$ мм для градации от 0 до 1 мм;

$d_i = 3$ мм для градации от 1,0 до 3,0 мм и т.д.);

h_j – наибольшее расстояние *j*-го слоя почвогрунта от поверхности почвы, см (например, $h_j = 10$ см для слоя от 0 до 10 см;

$h_j = 20$ см для слоя от 10 до 20 см и т.д.).

В соответствии с вышеупомянутой целевой установкой при подборе вариантов формирования культурценозов выполнено попарное сравнение моделей (1). Сравнение первых двух вариантов позволяет выявить влияние на морфоструктуру и корненасыщенность эдафических условий ели (пласты и дно борозд) в чистых культурах. Для этого в модели (1) вводится бинарная переменная как частный случай блоковой фиктивной переменной [9], кодирующая принадлежность экспериментальных данных *Pro* к тому или иному варианту формирования культурценозов: X = 0 для варианта 1 и X = 1 для варианта 2.

Сравнение вариантов 2 и 3 позволяет выявить влияние различной степени угнетения ели вторичным мелколиственным древостоем в одних и тех же эдафических условиях. Для этого в модели (1) вводится бинарная переменная: X = 0 для варианта 2 и X = 1 для варианта 3.

В итоге получаем модель:

$$Pro = f(d_i, h_j, X). \quad (2)$$

Для учета совместного действия факторов в модель (1) вводятся также произведения некоторых независимых переменных (синергизмы). В результате расчета моделей (2) по фактическим данным табл. 4 получены уравнения:

для сопоставления вариантов 1 (X = 0) и 2 (X = 1)

$$Pro = 59{,}775 - 2{,}510\, d_i - 5{,}792\, h_j + 0{,}139(h_j)^2 + 0{,}209 d_i h_j + 58{,}09\, X - 1{,}006 X h_j - 1{,}844 X d_i; \quad R^2 = 0{,}929 \quad (3)$$

и для сопоставления вариантов 2 (X = 0) и 3 (X = 1)

$$Pro = 63{,}716 - 1{,}078\, h_j - 0{,}166(d_{ij})^2 + 0{,}091 d_i h_j + 19{,}555\, X + 1{,}223\, X h_j; \quad R^2 = 0{,}978. \quad (4)$$

Значения R^2 и соотношение фактических и расчетных значений (рис.) свидетельствуют о достаточно высокой адекватности уравнений (3) и (4). Все рассчитанные в них константы значимы на уровне t_{05}, в том числе и при бинарной переменной X. Это означает, что статистически значимы не только расчетные относительные показатели фитомассы корней лиственных пород по толщинам и почвенному профилю, но и различия сопоставляемых вариантов (1-го со 2-м и 2-го с 3-м) по доле лиственных пород в общей массе корней. Путем табулирования уравнений (3) и (4) получены расчетные значения относительной массы корней лиственных пород, приведенные в табл. 4, наряду с фактическими значениями. Сопоставление их дало ошибку $SE = 19\%$.

Данные табл. 4 дают наглядное количественное выражение конкурентных отношений ели и лиственного полога по сравниваемым вариантам, при этом степень подавления ели лиственными породами, выраженная долей последних в общей массе корней, нарастает последовательно от ва-

4. Фактическая (числитель) и расчетная по уравнениям (2) и (3) (знаменатель) доля мелколиственных пород в общей массе корней культурценоза (%), распределенная по вариантам формирования культур ели в зависимости от толщины фракции корней и глубины почвенного слоя

Глубина почвенного слоя, см	Доля лиственных в общей массе корней (%) по градациям толщин, мм			
	0–1	1–3	3–10	10–16
Посадка в пласт. Открытое место. Состав 10Еед.Б (вариант 1)				
0–10	14,1 / 15,3	14,8 / 14,5	9,3 / 11,6	16,0 / 9,0
10–20	4,3 / 1,2	4,5 / 4,5	5,0 / 16,2	–
20–30	16,7 / 14,9	22,2 / 22,4	50,0 / 48,7	–
Посадка в дно борозды. Открытое место. Состав 10Еед.Б (вариант 2)				
0–10	57,3 / 61,5	55,5 / 57,0	48,2 / 41,1	22,2 / 27,6
10–20	39,5 / 37,3	45,2 / 37,0	36,5 / 35,8	30,8 / 34,7
20–30	31,0 / 40,9	44,4 / 44,8	63,6 / 58,2	–
Посадка в дно борозды. Ель под пологом. Состав 4Е4Б2Ос (вариант 3)				
0–10	82,2 / 85,5	82,9 / 85,9	78,2 / 77,2	–
10–20	91,1 / 87,3	89,9 / 90,1	97,2 / 87,8	–
20–30	92,3 / 90,2	91,5 / 94,3	95,6 / 98,3	–

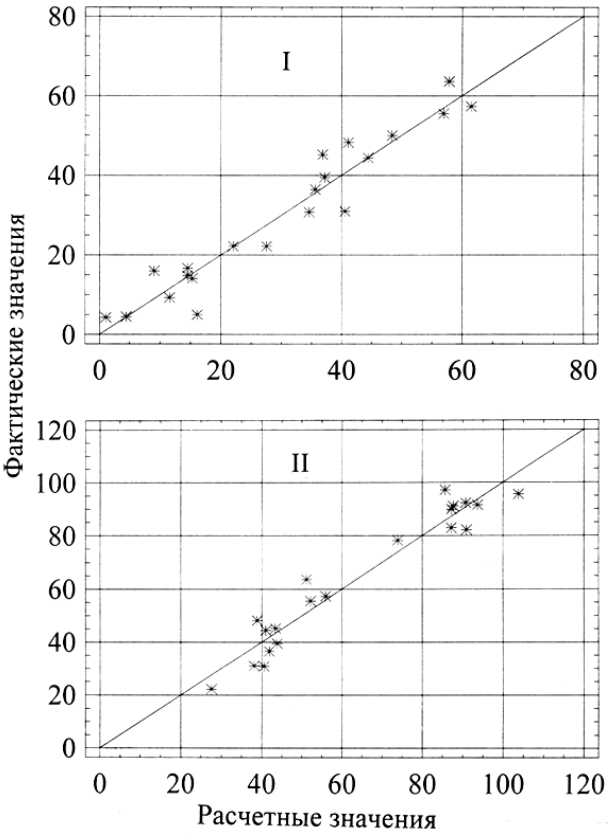


Рис. – Соотношение фактических (табл. 4) и расчетных (по уравнениям 2 и 3) значений доли корней мелколиственных пород в общей массе корней культурценоза (в % по массе) при сопоставлении вариантов 1 и 2 (I) и 2 и 3 (II)

рианта 1 к варианту 3 по всем почвенным горизонтам.

Более сильное конкурентное воздействие лиственных в варианте 2 по сравнению с вариантом 1 обусловлено тем, что в варианте 2 (борозды) ель имеет худшие эдафические условия роста, чем в первом случае (пласты), и, как уже отмечалось, уступает пространство ризосферы более приспособленным к этим условиям лиственным породам. Известно, что во влажных условиях произрастания ель предпочитает микроповышения (в том числе детриты), обладающие лучшей почвенной аэрацией и трофностью [10–12].

Преобладание доли лиственных в общей фитомассе корней в варианте 3 по отношению к варианту 2 в одних и тех же эдафических условиях (посадка ели в борозды) характеризует еще большую степень подавления ели, чем это было в вариантах 1 и 2, вследствие того, что рубки ухода в варианте 3 не проводились и быстрорастущие лиственные практически полностью захватили здесь пространство роста как в надземной, так и в подземной сфере.

Мы не выполняем подобную процедуру для фракционного распределения длины корней, поскольку ее результаты во многом повторяются.

Таким образом, вертикально-фракционное распределение массы и длины корней в пространстве ризосферы елового 33-летнего культурценоза, сформированного на вырубке и представленного культурами ели и мелколиственного древостоя последующего возобновления, является важной количественной характеристикой конкурентных отношений ели и лиственных пород.

В варианте 1 формирования культур (посадка ели в пласты) эдафические условия для роста ели благоприятнее (лучшие условия аэрации и трофности почвы), чем в варианте 2 (посадка в борозды), в результате чего корневая система ели получает лучшие условия развития, и ель лучше противостоит конкурентному давлению мелколиственных пород.

В одних и тех же эдафических условиях (посадка ели в пласты) в варианте 2 ель после прочисток получает лучшие условия для роста, чем в варианте 3, где прочистки с удалением мелколиственных не проводились. В результате доля корней лиственных в общей фитомассе корней в варианте 3 примерно в 8 раз выше, а доля корней ели, напротив, в 3 раза ниже по сравнению с вариантом 2.

Литература

1. Вертикально-фракционное распределение фитомассы в лесах / под ред. С.Э. Вомперского и А.И. Уткина. М.: Наука, 1986. 261 с.
2. Верзунов, А.И. Рост лиственницы и устойчивость культурных фитоценозов с ее господством на полугидроморфных почвах лесостепи Северного Казахстана // Экология. 1980. № 2. С. 38–44.
3. Крепкий, И.С. Корневые системы сосны в лесных культурах бора Аман-Карагай Кустанайской области // Лесные экосистемы в условиях континентального климата. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1987. С. 105–110.
4. Усольцев, В.А. Регрессионный анализ вертикально-фракционного распределения массы корней в сосняках Аман-Карагайского бора / В.А. Усольцев, И.С. Крепкий // Экология. 1994. № 2. С. 21–33.
5. Hoffmann, C.W., Usoltsev, V.A. Modelling root biomass distribution in *Pinus sylvestris* forests of the Turgai Depression of Kazakhstan // Forest Ecology and Management. 2001. Vol. 149. P. 103–114.
6. Чмыр, А.Ф. Лесные культуры: методические указания по исследованию корневых систем древесных пород. Л.: ЛЛТА, 1984. 40 с.
7. Колесников, В.А. Методы изучения корневой системы древесных растений. М.: Лесная пром-сть, 1972. 152 с.
8. Красильников, П.К. Методика полевого изучения подземных частей растений. Л.: Наука, 1983. 207 с.
9. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Драйпер, Г. Смит. М.: Статистика, 1973. 392 с.
10. Декатов, Н.Е. Влияние микрорельефа на возобновление ели // Опытно-исследоват. работы по общему лесоводству. М.; Л.: Сельколхозгиз, 1931. С. 251–295.
11. Усольцев, В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 707 с.
12. Терехов, Г.Г. Лесоводственная оценка самосева ели сибирской в еловых культурценозах Среднего Урала / Г.Г. Терехов, В.А. Усольцев, А.М. Бирюкова // Известия С.-Петербургской лесотехнической академии. 2007. Вып. 180. С. 20–31.
13. Усольцев, В.А. Этот загадочный род *Picea* // Вестник УрО РАН: Наука, общество, человек. Екатеринбург, 2003. №1(3). С. 108–113.