

УДК 630\*574:581.551.24:582.475

**СТРОЕНИЕ И МИКОРИЗАЦИЯ КОРНЕЙ СЕЯНЦЕВ ЕЛИ И ПИХТЫ  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЧВЕННОГО СУБСТРАТА\***

© 2002 г. Д. В. Веселкин

Институт экологии растений и животных УрО РАН  
620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

Поступила в редакцию 16.04.2001 г.

Обсуждается связь параметров строения и развития проводящих и поглощающих корней и эктомикориз с развитием побега ювенильных особей ели сибирской и пихты сибирской при произрастании в различных местообитаниях южной тайги. Параметры, характеризующие успешность развития эктомикориз, чаще всего связаны с высотой надземной части сеянцев хвойных.

*Ель сибирская, пихта сибирская, корневые системы, эктомикоризы.*

Хвойные растения бореальной зоны эффективно осуществляют процессы минерального и водного питания только в облигатном взаимодействии с эктомикоризными грибами [6, 7, 9, 11, 14]. Установлено, что микоризация активизирует процесс фотосинтеза и положительно сказывается на устойчивости растений к патогенам [5, 6]. Облигатная микотрофность хвойных расширяет их адаптивные возможности, позволяет им осваивать разнообразные местообитания и занимать ключевые позиции в лесных сообществах [5, 9, 13, 15].

Однако последствия формирования эктомикориз при произрастании хвойных в естественной природной обстановке не исследованы, поскольку современные представления о биологии и экологии эктомикоризных ассоциаций базируются на лабораторных или вегетационных экспериментах. Целью настоящего исследования был поиск параметров строения и микоризации корневых систем ювенильных особей пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), в наибольшей степени связанных с развитием надземных органов при произрастании растений в различных местообитаниях южной тайги. Работы проведены на пробных площадях, различно удаленных от крупного металлургического предприятия (ряд техногенно нарушенных лесов). Проанализировано также строение сеянцев, произрастающих в различных микроместообитаниях в пределах одних и тех же лесных сообществ.

**МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА**

Работы проведены в темнохвойных лесах южнотатаевского лесорастительного округа Среднеуральской низкогорной провинции (Свердловская

обл., Первоуральский и Нижне-Сергинский р-ны). Пробные площади расположены на различном расстоянии в западном направлении от Среднеуральского медеплавильного завода, выбрасывающего в атмосферу большое количество газообразных (преимущественно  $SO_2$ ) и твердых (Cd, Cu, Zn, Pb и As) промышленных отходов. Елово-пихтовые сообщества на пробных площадях относятся к липняковым и кисличниковым типам леса [2], расположены на верхних и средних частях пологих склонов на серых лесных почвах [4] и представляют собой последовательные стадии техногенной трансформации лесов (табл. 1). Под ярко выраженным техногенным воздействием в окрестностях предприятия трансформируются все основные компоненты лесных экосистем: почва, древостой, живой напочвенный покров, параметры микро- и зооценоза [2–4, 8, 10, 12].

В сентябре 1998 г. на 12 пробных площадях, расположенных в зонах сильного, умеренного и фонового загрязнения собраны двухлетние особи пихты, укоренившиеся на поверхности почвы. На площадях со слабым и умеренным уровнем загрязнения отобраны также двухлетние растения пихты и ели, произрастающие на упавших стволах деревьев, разлагающихся по типу белой (коррозионной) и бурой (деструктивной) гнили.

У сеянцев определяли длину главного корня с приближением до 1 мм, суммарную длину боковых корней и длину надсемядольной части растения. Под биноккулярной лупой подсчитывали число немикоризованных и микоризованных поглощающих корней (микориз) у одной особи. Подсчитывали также число простых (неразветвленных) и сложных (включающих 2 и более отдельных окончаний) микориз и число “нормальных” и “укороченных” корневых окончаний. За одно корневое окончание считали один немикоризованный по-

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (01-04-96407).

Таблица 1. Характеристики пробных площадей (размах значений)

Характеристика	Степень загрязнения		
	фоновое	слабое и умеренное	сильное
Удаление от источника загрязнения, км	30	4.5–7	1–2
Высота над уровнем моря, м	360–380	370–420	360–380
Содержание в $A_0$ , мкг г <sup>-1</sup>			
Cu	60–249	94–3134	2437–7969
Cd	2.00–5.75	3.23–18.73	8.27–22.88
Pb	54–120	69–1065	776–1738
Индекс загрязнения подстилки*	1.13–1.17	4.71–14.62	17.20–32.67
Состав древостоев	6П4Е+Б; 9П1Е+Б	6П4Е+Ос, Лп; 5П5Е+Б; 7П3Е; 8Е2П; 7Е3П	9П1Е+Б; 6П4Е+Б, Лп; 5П5Е; 8П2Е
Запас, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup> **	170–314	160–340	28–216
Доля сухостоя по запасу, %**	2.5–11.1	3.2–23.7	11.0–37.7
Растительная ассоциация**	Неморально-кисличная	Неморально-кисличная; кислично-разнотравная	Злаково-хвощевая; мохово-хвощевая

\* Индекс загрязнения подстилки показывает, во сколько раз превышен в данной точке фоновый уровень загрязнения по всему комплексу поллютантов. Его рассчитывали как отношение суммы превышений концентраций Cu, Cd, Pb в данной точке над минимальной фоновой суммой концентраций поллютантов к соответствующему минимальному фоновому показателю [2].

\*\* Данные из [2].

глошающий корень, одну простую микоризу и каждое отдельное окончание, входящее в состав сложной микоризы. Ростковые корни в данном случае не учитывали. К “укороченным” относили окончания, длина которых не более чем в 2 раза превосходит их диаметр, к “нормальным” причисляли более вытянутые окончания. Интенсивность микоризации (отношение числа микориз к сумме микориз и немикоризованных поглощающих корней) и плотность микориз (число микориз на 100 мм длины проводящих корней) определяли по [7]. В каждом варианте проанализировано по 30–100 растений.

Связь параметров строения корневых систем с приростом сеянцев в высоту за 2 года исследовали традиционными методами корреляционного анализа, а также путем расчета коэффициентов множественного линейного регрессионного уравнения с предварительным нахождением главных компонент. При этом исходные независимые переменные (признаки строения корневых систем и микориз) стандартизировали, а затем трансформировали в линейную комбинацию новых переменных – главных компонент. Размерность пространства главных компонент понижали до порядка, когда кумулятивное произведение собственных величин, соответствующих собственным векторам главных компонент, оставалось больше единицы. В новой системе координат оценивали коэффициенты регрессии и их доверительные интервалы. Потом проводили обратную трансформацию, в ре-

зультате чего получали значения коэффициентов регрессии для независимых переменных. В такой множественной линейной регрессионной модели влияние каждой из независимых переменных нормировано, поэтому абсолютные значения коэффициентов регрессии характеризуют относительный вклад каждой независимой переменной в изменчивость прироста сеянцев в высоту за 2 года. Использованная процедура расчета коэффициентов регрессии полностью аналогична процедуре расчета климатических функций отклика приростов деревьев [1]. Для расчетов использовали программу RESPONSE, входящую в пакет DENDROCHRONOLOGY PROGRAM LIBRARY (Richard L. Holmes, 1994).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В условиях ярко выраженного загрязнения лесных экосистем пылью тяжелых металлов в комплексе с SO<sub>2</sub> в строении корневой системы сеянцев пихты обнаружены заметные отличия. Длина главного корня уменьшается с 58.00 ± 4.17 мм в естественных лесах до 44.59 ± 3.08 мм на удалении 2 км от предприятия и до 34.57 ± 3.16 мм на удалении 1 км. Боковые проводящие корни при загрязнении развиваются активно: в ненарушенных лесах они представлены у 16.67% всех особей, а в условиях загрязнения – у 82.26%; в первом случае на боковые корни приходится около 4% общей длины проводящих корней, во втором – 41–67%. Об-



шая длина проводящих корней по мере увеличения степени загрязнения возрастает в 1.5–2 раза: при фоновом загрязнении –  $61.34 \pm 4.70$  мм, при слабом и умеренном –  $56.72$ – $65.62$  мм, при сильном –  $90.53$ – $146.19$  мм. У растений на сильно загрязненных площадях интенсивно закладываются поглощающие корни, число которых у одного семянца возрастает в 2–2.9 раза по сравнению с ненарушенными лесами.

Интенсивность микоризации составляет в ненарушенных лесах  $77.91 \pm 4.69$  %, в слабо и умеренно нарушенных лесах –  $76.42 \pm 2.39$  % (7 км от предприятия) и  $83.66 \pm 1.44$  % (4 км), на сильно загрязненных участках –  $76.84 \pm 2.51$  % (2 км) и  $86.22 \pm 1.81$  % (1 км). Возрастание количества поглощающих корней и эффективное преобразование их в микоризы приводят к тому, что число микориз у одной особи в условиях загрязнения оказывается в 2.8–3.5 раза большим, чем в контроле. Одновременно с этим в 2–2.4 раза увеличивается доля разветвленных микориз. В непосредственной близости от предприятия представленность укороченных корневых окончаний возрастает в 1.5–2.9 раза.

Двухгодичный прирост сеянцев в высоту не зависит от уровня техногенной нагрузки: в ненарушенных сообществах он составляет  $16.91 \pm 0.74$  мм, а в сильно загрязненных  $15.67 \pm 1.05$  мм.

При произрастании на валеже длина главного корня сеянцев пихты и ели увеличивается на 17–42%, боковых корней – на 35–178%. Суммарная длина проводящих корней пихты при развитии на поверхности почвы составляет  $62.34 \pm 2.28$  мм, на валеже с бурой гнилью в тех же лесах –  $76.14 \pm 8.99$  мм, на валеже с белой гнилью –  $109.76 \pm 6.16$  мм. Соответствующие цифры для ели составляют  $59.05 \pm 4.02$  мм,  $84.97 \pm 5.26$  мм и  $93.48 \pm 7.65$  мм. Число поглощающих корней у одной особи при произрастании на валеже увеличивается у пихты на 5–50%, у ели на 50–67%.

Успешность формирования микориз при укоренении на разлагающихся древесных остатках понижена. Часть произрастающих на валеже особей (5–13%) оказалась полностью безмикоризна, в то время как на корнях сеянцев с поверхности почвы микоризы обнаружены во всех случаях. Средние величины интенсивности микоризации при размещении корней растений в подстилке и гумусовом горизонте составили  $80.98 \pm 1.30$  % (пихта) и  $90.31 \pm 1.80$  % (ель), на валеже с бурой гнилью соответственно  $66.96 \pm 5.66$  и  $77.93 \pm 3.24$  %, на валеже с белой гнилью –  $67.60 \pm 3.30$  и  $79.93 \pm 3.17$  %. Длина надсемядольной части сеянца не зависит от места укоренения и варьирует в пределах 13.1–14.5 мм у пихты и 17.4–18.6 мм у ели.

Таким образом, в различающихся по эдафическим условиям местообитаниях южнотаежных лесов заметно изменяются как морфометрические особенности корневых систем сеянцев пихты и

ели, так и параметры, характеризующие степень развития микориз. В разных местообитаниях (в техногенно нарушенных лесных сообществах и в микрестообитаниях “поверхность почвы” – “валеж с бурой гнилью” – “валеж с белой гнилью”) увеличивается суммарная протяженность проводящих корней и увеличивается число физиологически активных, поглощающих корневых структур – поглощающих корней и микориз. Однако изменения в строении подземных органов в указанных двух рядах местообитаний происходят по-разному. Например, признаки, свидетельствующие о повреждении корней (уменьшение длины главного корня и возрастание встречаемости укороченных корневых окончаний), наблюдаются только в ряду техногенно загрязненных местообитаний. Наиболее характерной отличительной чертой строения корневых систем при произрастании сеянцев на валеже является меньшая интенсивность микоризации поглощающих корней.

Судя по значениям коэффициентов корреляции и корреляционных отношений, представленных в табл. 2, связи между различными параметрами строения корневых систем сеянцев с приростом в высоту за 2 года преимущественно являются слабыми и недостоверными. Только 12 из 88 рассчитанных коэффициентов корреляции имеют значения выше 0.50. Тем не менее, в большей части анализируемых выборок есть признаки, заметно скоррелированные с состоянием надземной части особи. Чаще всего в пределах одной выборки максимальная теснота связи с длиной надсемядольной части сеянца характерна для показателя “число микориз” ( $r$  в 6 выборках из 11,  $\eta$  в 6 выборках). Реже максимальные значения  $r$  и  $\eta$  обнаруживаются в отношении таких параметров, как “интенсивность микоризации” (3 выборки с валежа), “общая длина проводящих корней” (2 выборки в условиях сильного загрязнения) и “число поглощающих корней” ( $r$  – 1 случай,  $\eta$  – 2 случая). Не максимальные, но статистически достоверные значения  $r$  и  $\eta$  представлены следующим образом: “число микориз” – 11 случаев из 11 ( $r$ ) и 6 случаев из 11 ( $\eta$ ), “интенсивность микоризации” – 10 и 1, “число поглощающих корней” – 7 и 3, “длина главного корня” – 7 и 0, “общая длина проводящих корней” – 6 и 2. На основании учета встречаемости максимальных и достоверных значений  $r$  и  $\eta$  рассчитан средний ранг тесноты связи признака с приростом в высоту за 2 года в 11 проанализированных выборках растений.

Из рассмотренных параметров строения корневых систем один признак (доля укороченных корневых окончаний) отрицательно связан с приростом сеянцев в высоту, а остальные – положительно. Большая часть исследуемых зависимостей может быть удовлетворительно аппроксимирована уравнением прямой, о чем свидетельствует достаточная близость значений  $r$  и  $\eta$ . Только в

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции и корреляционные отношения (в скобках), характеризующие связь параметров строения и микоризации корневых систем с приростом сеянцев в высоту за 2 года в разных местообитаниях

Параметр, ранг	Степень загрязнения и удаление от предприятия, км					Место укоренения		
	фоновое	слабое и умеренное		сильное		подстилка	белая гниль	бурая гниль
	30	7	4.5	2	1			
Длина главного корня (5)	0.36	0.37*	0.25*	0.39**	0.63**	$\frac{0.29***}{0.35*}$ (0.33) (0.47)	$\frac{0.04}{0.37**}$ (0.26) (0.55)	$\frac{0.33}{-0.08}$ (0.41) (0.33)
	(0.49)	(0.45)	(0.36)	(0.53)	(0.69)			
Общая длина проводящих корней (4)	0.37	0.35*	0.19	0.58***	0.86***	$\frac{0.28***}{0.32*}$ (0.30) (0.49)	$\frac{0.09}{0.32*}$ (0.24) (0.43)	$\frac{0.08}{-0.09}$ (0.25) (0.40)
	(0.47)	(0.46)	(0.29)	(0.60*)	(0.93**)			
Число поглощающих корней (3)	0.32	0.54***	0.25*	0.49***	0.79***	$\frac{0.41***}{0.45**}$ (0.48*) (0.51)	$\frac{0.07}{0.34**}$ (0.28) (0.41)	$\frac{-0.02}{-0.12}$ (0.19) (0.32)
	(0.64)	(0.61*)	(0.38)	(0.53)	(0.85**)			
Число микориз (1)	0.67***	0.54***	0.35**	0.54***	0.81***	$\frac{0.44***}{0.51***}$ (0.47*) (0.59)	$\frac{0.23*}{0.48***}$ (0.41) (0.59*)	$\frac{0.35*}{0.30*}$ (0.44) (0.41)
	(0.68*)	(0.58*)	(0.39)	(0.60*)	(0.89**)			
Интенсивность микоризации (2)	0.41*	0.38**	0.28**	0.35**	0.17	$\frac{0.30***}{0.34*}$ (0.33) (0.34)	$\frac{0.39***}{0.35**}$ (0.41) (0.37)	$\frac{0.53**}{0.51***}$ (0.55) (0.57*)
	(0.48)	(0.40)	(0.29)	(0.45)	(0.37)			
Плотность микориз (7)	0.38	0.27	0.15	-0.03	-0.17	$\frac{0.21*}{0.14}$ (0.38) (0.40)	$\frac{0.23*}{0.22}$ (0.39) (0.35)	$\frac{0.34}{0.43***}$ (0.47) (0.47)
	(0.46)	(0.42)	(0.25)	(0.40)	(0.39)			
Доля сложных микориз (7)	0.26	0.20	0.22*	-0.13	-0.20	$\frac{0.18*}{0.15}$ (0.33) (0.28)	$\frac{0.15}{0.19}$ (0.30) (0.50)	$\frac{0.38*}{0.19}$ (0.41) (0.41)
	(0.40)	(0.32)	(0.32)	(0.34)	(0.31)			
Доля укороченных корневых окончаний (6)	-0.27	-0.35*	-0.24*	-0.33**	0.02	$\frac{-0.26**}{0.01}$ (0.40*) (0.21)	$\frac{-0.21}{-0.01}$ (0.28) (0.23)	$\frac{-0.26}{-0.16}$ (0.52) (0.32)
	(0.46)	(0.48)	(0.36)	(0.38)	(0.31)			

\* Уровень значимости  $p < 0.05$ .

\*\* Уровень значимости  $p < 0.01$ .

\*\*\* Уровень значимости  $p < 0.001$ .

Примечание. В числителе – пихта, в знаменателе – ель.



**Таблица 3.** Частные коэффициенты множественной линейной регрессии стандартизированных параметров строения и микоризации корневых систем на прирост семян в высоту за 2 года в разных местообитаниях

Параметр	Степень загрязнения и удаление от предприятия, км					Место укоренения		
	фоновое	слабое и умеренное		сильное		под- стилка	белая гниль	бурая гниль
	30	7	4.5	2	1			
Длина главного корня	0.12	-0.05	0.10	0.09	0.25*	$\frac{0.08}{0.09}$	$\frac{0.08}{0.21^*}$	$\frac{0.26}{0.14}$
Общая длина проводящих корней	0.15	0.33*	0.14	0.23*	0.29*	$\frac{0.14^*}{0.18}$	$\frac{-0.02}{0.12^*}$	$\frac{0.02}{-0.01}$
Число поглощающих корней	0.12	0.14	0.07	0.19*	0.23*	$\frac{0.11^*}{0.10}$	$\frac{-0.01}{0.04}$	$\frac{-0.05}{-0.11}$
Число микориз	0.33*	0.16*	0.15*	0.18*	0.21*	$\frac{0.14^*}{0.14^*}$	$\frac{0.11^*}{0.16^*}$	$\frac{0.07}{0.15^*}$
Интенсивность микоризации	0.17	0.20	0.15	0.08	-0.08	$\frac{0.11}{0.18}$	$\frac{0.16^*}{0.29^*}$	$\frac{0.16^*}{0.25^*}$
Плотность микориз	0.21	-0.03	-0.01	-0.05	-0.13	$\frac{0.01}{-0.05}$	$\frac{0.09}{0.02}$	$\frac{0.04}{0.13^*}$
Доля сложных микориз	0.31	0.17	0.34*	0.08	-0.11	$\frac{0.26^*}{0.04}$	$\frac{0.01}{0.19}$	$\frac{0.29}{0.12}$
Доля укороченных корневых окончаний	-0.05	-0.37*	-0.30*	-0.16	0.13	$\frac{-0.30^*}{0.04}$	$\frac{-0.24^*}{-0.05}$	$\frac{-0.10}{-0.04}$
Коэффициент множественной корреляции (R)	0.771	0.709	0.578	0.662	0.928	$\frac{0.578}{0.524}$	$\frac{0.405}{0.566}$	$\frac{0.625}{0.533}$

\* Уровень значимости  $p < 0.05$ .

Примечание. В числителе – пихта, в знаменателе – ель.

5 случаях зависимости не являются прямолинейными.

Значения коэффициента множественной корреляции 8 рассмотренных параметров строения корневых систем с приростом семян пихты и ели в высоту варьируют в зависимости от условий произрастания от 0.41 до 0.93 (табл. 3), при этом суммарная изменчивость параметров строения и микоризации корневых систем обуславливает 16–86% дисперсии двухгодичного прироста семян в высоту, в среднем 30–60%. В каждой выборке достоверное влияние на состояние надземной части семян оказывают 1–5 параметров строения корневых систем. Значимые положительные частные коэффициенты регрессии встречаются с такими частотами: “число микориз” – в 10 случаях из 11, “общая длина проводящих корней” – в 5, “интенсивность микоризации” – в 4, “число поглощающих корней” – в 3, “длина главного корня” и “доля сложных микориз” – по 2 случая и “плотность микориз” – в единственном случае. Высокая представленность укороченных корневых окончаний оказывает отрицательное влияние на развитие надземной части семян пихты в 4 случаях, причем всегда очень существенное.

В 8 рассматриваемых выборках наибольшее влияние на развитие побега у ювенильных хвой-

ных оказывают признаки, характеризующие те или иные стороны процесса микоризообразования, соответственно только в 3 случаях ведущее положение занимает параметр “общая длина проводящих корней”, т.е. признак, характеризующий общие морфологические особенности строения корневой системы. Данная закономерность является, по нашему мнению, фактическим свидетельством ведущего положительного значения микотрофии в развитии ювенильных хвойных в большей части изученных местообитаний.

Ключевое значение микоризации в определении успешности развития надземной части растений хорошо просматривается на примере семян, произрастающих на валежной древесине. В этих условиях у обоих видов хвойных максимальный вклад в дисперсию двухлетнего прироста в высоту дает параметр “интенсивность микоризации”. Вероятно, подобная закономерность является следствием того обстоятельства, что при произрастании на валеже заметно меньшая часть поглощающих корней заселяется микоризными грибами, чем при развитии растений на поверхности почвы, в результате чего зависимость между приростом надземной части в высоту и показателем интенсивности микоризации выступает более явно и отчетливо, чем в прочих случаях.

Поскольку в зависимости от условий произрастания состав основных признаков строения корневых систем, влияющих на длину надсемядольной части сеянцев, существенно изменяется, можно предположить существование различных оптимальных способов освоения почвы корневыми системами ювенильных хвойных. Например, на участках с ярко выраженным техногенным воздействием успешное развитие надземной части сопряжено преимущественно с активным формированием системы проводящих корней и благоприятным для растений является, по всей вероятности, "экстенсивный" способ освоения почвы, связанный с охватом и использованием ее наибольшего объема. В случаях, когда наибольшее влияние на прирост стволика в высоту оказывают параметры, характеризующие формирование физиологически активных поглощающих органов (микориз), можно предполагать благоприятность "интенсивного" использования почвенного субстрата, связанного с максимальным насыщением определенного объема почвы поглощающими органами.

**Заключение.** В различных местообитаниях южной тайги наиболее важными признаками строения и микоризации корневых систем ювенильных особей ели сибирской и пихты сибирской, тесно связанными с развитием надземной части растений, являются параметры, характеризующие строение микориз (число микориз у одного сеянца и интенсивность микоризации). Параметры, характеризующие общие морфологические особенности строения корневых систем, реже выступают в качестве основных признаков, детерминирующих успешность развития надземной части сеянцев.

Выражаю искреннюю признательность д-ру биол. наук В.С. Мазепе за консультации по использованию программы DENDROCHRONOLOGY PROGRAM LIBRARY.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.

2. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
3. Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В. Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение: зависимость доза-эффект // Экология. 1994. № 3. С. 31–43.
4. Кайгородова С.Ю., Воробейчик Е.Л. Трансформация некоторых свойств серых лесных почв под действием выбросов медеплавильного комбината // Экология. 1996. № 3. С. 187–193.
5. Каратыгин И.В. Коэволюция грибов и растений. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 115 с.
6. Лобанов Н.В. Микотрофность древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 216 с.
7. Селиванов И.А. Микосимбиотрофизм как форма консортивных связей в растительном покрове Советского Союза. М.: Наука, 1981. 232 с.
8. Фомин В.В. Морфофизиологическая оценка состояния сосновых молодняков в зоне действия атмосферных загрязнений Первоуральско-Ревдинского промышленного узла: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 03.00.16. Екатеринбург. 1998. 23 с.
9. Харли Дж. Биология микоризы // Микориза растений. М.: Мир, 1963. С. 15–244.
10. Шебалова Н.М., Бабушкина Л.Г. Биологическая активность лесной подстилки и почвы в импактных зонах загрязнения // Биологическая рекультивация нарушенных земель. Екатеринбург. 1997. С. 259–266.
11. Шемаханова Н.М. Микотрофия древесных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 374 с.
12. Юсупов И.А., Луганский Н.А., Залесов С.В. Состояние искусственных молодняков в условиях аэропромвыбросов. Екатеринбург, 1999. 185 с.
13. Bradley R. K. Fungi from decayed wood as ectomycorrhizal symbionts of western hemlock // Can. J. For. Res. 1982. V. 12. № 1. P. 36–39.
14. France R. C., Reid C.P.P. Interaction of nitrogen and carbon in the physiology of ectomycorrhizae // Can. J. Bot. 1983. V. 61. № 3. P. 964–984.
15. John T.V., Coleman D.C. The role of mycorrhizae in plant ecology // Can. J. Bot. 1983. V. 61. № 3. P. 1005–1014.

## Structure and Mycorrhization of Roots in Spruce and Fir Seedlings under Changes of Soil Substrate

D. V. Veselkin

The relationships between the structure and mycorrhization of root systems and heights of 2-year-old Siberian spruce (*Picea obovata*) and Siberian fir (*Abies sibirica*) seedlings were analyzed using the correlation and multiple regression analyses. The seedlings were taken in some dark coniferous forests growing on different soils in the southern taiga. Specific morphometric features of roots and peculiarities of developing mycorrhiza in seedlings characteristic of different edaphic conditions were found. The parameters characterizing the successful formation of ectomycorrhiza (intensity of mycorrhization and numbers of mycorrhiza) are mainly related to the level of developing the aboveground parts of seedlings. Such morphological parameters of root systems as the length of conducting roots and the number of sucking roots more rarely determine the successful development of aboveground parts in seedlings. The materials obtained confirm that the intense development of mycorrhizal symbioses is an obligatory condition for the growth of juvenile coniferous trees in nature.