

ЗАВИСИМОСТЬ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА СУХОДОЛЬНЫХ  
СОСНЯКОВ БЕРЕЗИНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА  
ОТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Основной целью исследований было изучение влияния климатических факторов на величину радиального прироста деревьев различных типов леса и выявление из них наиболее значимых путем корреляционного и регрессионного анализов. Моделирование радиального прироста приобретает особое значение для экологического мониторинга — количественно выражая сложившиеся связи в экосистеме, оно позволяет контролировать стабильность системы и выявлять ее существенные изменения.

Исследования проводились на постоянных пробных площадях в суходольных сосняках: лишайниковом ( $Y_1$ ), мшистом ( $Y_2$ ) и черничном ( $Y_3$ ), где среднее многолетнее положение уровня грунтовых вод за период вегетации составляет соответственно 663, 244 и 138 см.

В каждом из названных типов леса керны древесины отбирались с восточной и западной сторон у 10—12 деревьев I—II классов развития по Крафту [2, 3] на высоте 1,3 м шведским возрастным буровом с последующим измерением ширины годичных колец под микроскопом МБС-9 с точностью до 0,05 мм. Анализировались кольца последних 20 лет (1964—1983), за которые имеются метеорологические данные по станции комплексного фонового мониторинга "Березинский заповедник".

Графическое сопоставление динамики прироста сосняков (рис. 1) показывает, что на протяжении рассматриваемого периода характер изменения колебаний прироста сходный. Статистический анализ позволил выявить тесную корреляционную связь величины прироста сосняков между собой:  $r(Y_1, Y_2) = 0,839$ ,  $r(Y_1, Y_3) = 0,704$ ,  $r(Y_2, Y_3) = 0,759$ .

Материалы обрабатывались методом множественной линейной регрессии в вычислительном центре АН БССР.

Матрица корреляций радиального прироста с метеофакторами и метеофакторов между собой приведена в табл. 1, а расшифровка принятых обозначений — в табл. 2.

Из табл. 1 видно, что радиальный прирост в сосняке лишайниковом значим ( $r_{np} = 0,44$  для  $P = 0,95$ ) и положительно коррелирует с факторами  $X_8$  ( $r = 0,446$ ),  $X_{17}$  ( $r = 0,487$ ),  $X_{18}$  ( $r = 0,444$ ). В сосняке мшистом радиальный прирост положительно коррелирует с  $X_8$  ( $r = 0,573$ ),  $X_9$  ( $r = 0,543$ ),  $X_{17}$  ( $r = 0,476$ ),  $X_{18}$  ( $r = 0,472$ ), в черничном — с  $X_{11}$  ( $r = 0,475$ ),  $X_{12}$  ( $r = 0,544$ ),  $X_{13}$  ( $r = 0,545$ ),  $X_{18}$  ( $r = 0,579$ ). По знаку и абсолютной величине выделенные факторы влияют на прирост примерно одинаково, общим для всех трех типов сосняков значимым фактором является  $X_{18}$  (коэффициент ГТК-2).

Вообще обращает на себя внимание корреляция метеорологических факторов между собой. Можно выделить следующие группы, внутри которых

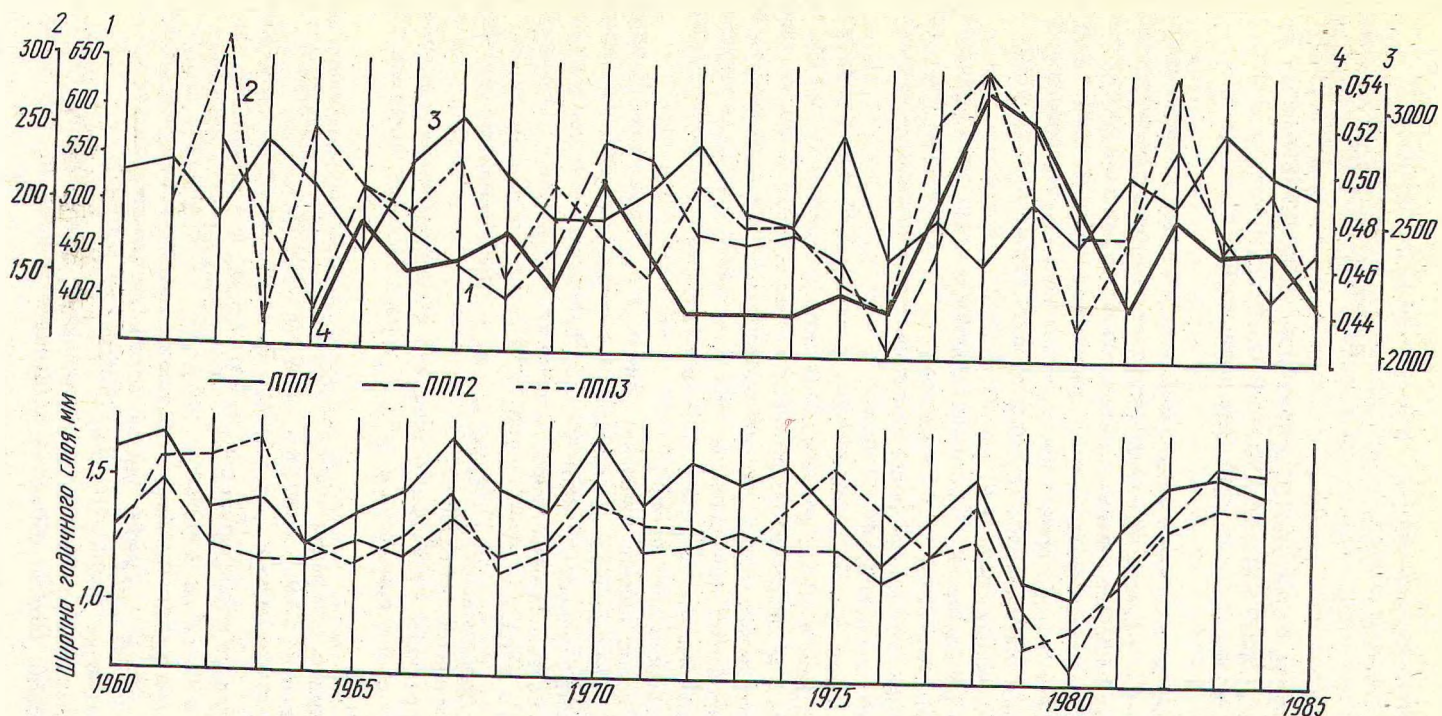


Рис. 1. Динамика радиального прироста суходольных сосняков в зависимости от климатических факторов: 1 — сумма осадков  $\geq 5$  мм за 2 года, VI—IX месяцы; 2 — сумма осадков  $\geq 10$  мм, V—IX месяцы; 3 — сумма температур выше  $0^{\circ}\text{C}$  за год; 4 — гидротермический коэффициент  $-2$ .

Таблица 1. Корреляционная матрица величины радиального прироста суходольных сосняков и метеофакторов

	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
$Y_1$	1,0000										
$Y_2$	0,8391	1,0000									
$Y_3$	0,7044	0,7594	1,0000								
$X_1$	-0,0047	0,0220	-0,1996	1,0000							
$X_2$	0,0657	0,1211	-0,1238	0,9127	1,0000						
$X_3$	0,2733	0,2957	-0,0286	0,8011	0,8892	1,0000					
$X_4$	0,2309	0,2160	-0,2036	0,4741	0,5522	0,6956	1,0000				
$X_5$	0,1441	0,1551	-0,1693	0,5590	0,6763	0,6560	0,8907	1,0000			
$X_6$	0,2473	0,3467	0,1055	0,7010	0,7491	0,9099	0,4732	0,4027	1,0000		
$X_7$	0,0323	0,0807	-0,1869	0,8969	0,9682	0,8861	0,6599	0,7555	0,7092	1,0000	
$X_8$	0,4456	0,5731	0,2586	0,5909	0,6325	0,7427	0,5876	0,5441	0,6615	0,5931	1,0000
$X_9$	0,4150	0,5429	0,1344	0,3811	0,4730	0,6310	0,8305	0,7359	0,4740	0,5096	0,8438
$X_{10}$	0,1876	0,1371	0,1975	-0,1841	-0,2208	-0,2245	-0,2017	-0,2220	-0,1376	-0,3353	0,0628
$X_{11}$	0,3145	0,3666	0,4747	-0,2334	-0,3251	-0,2777	-0,0885	-0,1044	-0,1667	-0,3761	0,1114
$X_{12}$	0,3230	0,3418	0,5441	-0,4231	-0,5298	-0,4153	-0,2157	-0,2732	-0,2355	-0,5645	-0,0749
$X_{13}$	0,2770	0,3224	0,5450	-0,3852	-0,5325	-0,4228	-0,2958	-0,3802	-0,2302	-0,5625	-0,1008
$X_{14}$	0,2394	0,1211	0,1964	-0,2376	-0,3023	-0,3003	-0,1216	-0,1534	-0,2648	-0,3585	-0,0356
$X_{15}$	0,3710	0,2608	0,3141	-0,1822	-0,2536	-0,1652	-0,0771	-0,1575	-0,0676	-0,3305	-0,0925
$X_{16}$	0,0857	0,0732	0,3206	-0,5003	-0,5968	-0,6140	-0,3551	-0,3330	-0,4861	-0,6185	-0,3851
$X_{17}$	0,4866	0,4757	0,1841	0,5139	0,6494	0,8000	0,4769	0,4135	0,7124	0,6571	0,6031
$X_{18}$	0,4443	0,4724	0,5794	-0,1742	-0,2765	-0,1220	0,0417	-0,0624	-0,0031	-0,2949	0,2060
$X_{19}$	-0,0646	-0,0008	-0,3174	0,4131	0,4786	0,5244	0,8304	0,8124	0,2551	0,6066	0,5156

	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>
Y <sub>1</sub>											
Y <sub>2</sub>											
Y <sub>3</sub>											
X <sub>1</sub>											
X <sub>2</sub>											
X <sub>3</sub>											
X <sub>4</sub>											
X <sub>5</sub>											
X <sub>6</sub>											
X <sub>7</sub>											
X <sub>8</sub>											
X <sub>9</sub>	1,0000										
X <sub>10</sub>	-0,0916	1,0000									
X <sub>11</sub>	0,0762	0,6801	1,0000								
X <sub>12</sub>	-0,0576	0,4966	0,9158	1,0000							
X <sub>13</sub>	-0,1217	0,4212	0,8565	0,9696	1,0000						
X <sub>14</sub>	-0,0660	0,9169	0,6431	0,4647	0,3724	1,0000					
X <sub>15</sub>	-0,0178	0,9149	0,7486	0,6033	0,5139	0,9445	1,0000				
X <sub>16</sub>	-0,3365	0,5799	0,8716	0,8798	0,8345	0,5966	0,6291	1,0000			
X <sub>17</sub>	0,4592	-0,0724	-0,2244	-0,3712	-0,3937	-0,0710	0,0373	0,4836	1,0000		
X <sub>18</sub>	0,2084	0,4465	0,8663	0,9102	0,9079	0,4033	0,5873	0,6973	-0,1349	1,0000	
X <sub>19</sub>	0,7545	-0,3796	-0,2652	-0,3870	-0,4339	-0,2590	-0,2760	-0,4805	0,3527	-0,1409	1,0000

Таблица 2. Расшифровка обозначений независимых переменных

Условное обозначение	Расшифровка	Условное обозначение	Расшифровка
Y	радиальный прирост, мм	X <sub>10</sub>	среднесуточная температура воздуха за V—IX месяцы
X <sub>1</sub>	сумма осадков ≥ 5 мм за VI—VIII месяцы	X <sub>11</sub>	" " " за гидрологический год
X <sub>2</sub>	" " за VI—IX "	X <sub>12</sub>	" " " за 2 гидрологических года
X <sub>3</sub>	" " за V—IX "	X <sub>13</sub>	" " " за 3 " "
X <sub>4</sub>	" " за V—IX, 2 года	X <sub>14</sub>	сумма среднесуточных температур > 10°C
X <sub>5</sub>	" " за VI—IX "	X <sub>15</sub>	" " " > 0°C
X <sub>6</sub>	сумма осадков ≥ 10 мм за V—IX месяцы	X <sub>16</sub>	коэффициент ГТК-1
X <sub>7</sub>	" " за VI—IX "	X <sub>17</sub>	сумма осадков за календарный год
X <sub>8</sub>	" " за гидрологический год	X <sub>18</sub>	коэффициент ГТК-2
X <sub>9</sub>	" " за 2 гидрологических года	X <sub>19</sub>	" ГТК-3

Примечание. ГТК-1 =  $\frac{t_0 \cdot 100}{V_1}$ ; (1)

$$\text{ГТК-2} = \frac{(V_3 + 2V_2 + 3V_1 + 4V_0)(t_3 + 2t_2 + 3t_1 + 4t_0)}{10 \cdot 10 \cdot 100}; \quad (2)$$

$$\text{ГТК-3} = \frac{V_3 + 2V_2 + 3V_1 + 4V_0}{(t_3 + 2t_2 + 3t_1 + 4t_0) \cdot 100} \quad (3)$$

где V — сумма осадков за гидрологический год (октябрь предыдущего — сентябрь текущего); t — в формуле (1) — средняя температура воздуха за гидрологический год, в формуле (2) — среднегодовая температура воздуха, в формуле (3) — сумма температур за май—август, индексы 0, 1, 2, 3 — годы (текущий, предыдущий и т.д.).

Таблица 3. Показатели регрессионного анализа для линейной модели

Переменная	Коэффициент	T-критерий
$X_0$	1,28	
$X_1$	-0,002	-1,733
$X_5$	0,002	4,277
$X_6$	-0,003	-6,388
$X_8$	0,002	3,969
$X_{10}$	-0,219	-4,976
$X_{11}$	-0,220	-4,896
$X_{13}$	0,047	2,109
$X_{15}$	0,002	4,242
$X_{18}$	-0,005	-0,260
$X_{19}$	-9,105	-10,916

имеются тесные корреляционные связи:  $(X_1, X_2, X_3, X_6, X_7, X_9)$ ,  $(X_4, X_5, X_9, X_{19})$ ,  $(X_{10}, X_{11}, X_{14}, X_{15})$ ,  $(X_{12}, X_{13}, X_{16}, X_{18})$ .

Результаты регрессионного анализа для линейной модели первого порядка приведены в табл. 3. Свободный член уравнения равен 1,28. Модель адекватна ( $F_{ад} = 28,56$ ,  $r_{мн} = 0,995$  при  $F_{табл} = 4,4$ ). Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,98$ . Значимыми оказались коэффициенты при  $X_5, X_6, X_8, X_{10}, X_{11}, X_{16}, X_{18}$  и  $X_{19}$ . Настораживают знаки отдельных коэффициентов — отрицательное влияние увеличения количества осадков и температуры.

Существенным условием применимости регрессионного анализа является независимость переменных [1]. Как уже отмечалось, это условие в нашем случае нарушается. В целом известно [4], что гидрометеорологические условия вегетационного периода — температура, фотосинтетически активная радиация, влажность воздуха, почвы, осадки и т.д., взятые в виде сумм или средних за отрезки вегетационного периода любой продолжительности, сильно коррелируют между собой.

В связи с этим была рассчитана модель только от независимых факторов ( $X_8, X_{18}$ ), коррелирующих с величиной радиального прироста. Существенно снизило дисперсию адекватности введение дополнительной переменной  $X_8, X_{18}$ , что говорит о существовании взаимодействия между этими факторами, т.е. степень влияния одного фактора зависит от того, на каком уровне находится другой. Зависимость имеет вид  $Y = -13,17 + 0,0197 X_8 + 0,44 X_{18} - 0,000596 X_8 X_{18}$ .

Представляется необходимым остановиться на вопросе адекватности моделей радиального прироста. Традиционно критерий Фишера рассчитывается по формуле

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2}$$

Таблица 4. Радиальный прирост для различных значений факторов  $X_8$  и  $X_{18}$ , мм

$X_8$	$X_{18}$												
	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
550	0,95	1,05	1,17	1,29	1,40	1,51	1,63	1,74	1,85	1,97	2,08	2,19	2,31
600	1,07	1,15	1,23	1,32	1,40	1,49	1,57	1,65	1,74	1,82	1,90	1,99	2,07
650	1,19	1,24	1,30	1,35	1,40	1,46	1,51	1,56	1,62	1,67	1,72	1,78	1,83
700	1,31	1,33	1,36	1,38	1,41	1,43	1,45	1,48	1,50	1,52	1,55	1,57	1,66
750	1,43	1,42	1,42	1,41	1,41	1,40	1,40	1,39	1,38	1,38	1,37	1,37	1,36
800	1,55	1,52	1,48	1,44	1,41	1,37	1,34	1,30	1,27	1,23	1,19	1,16	1,12
850	1,67	1,61	1,54	1,49	1,41	1,34	1,28	1,21	1,15	1,08	1,02	0,95	0,89

где  $S_{ад}^2$  — дисперсия адекватности:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_{ip})^2}{N - L}$$

(здесь  $\bar{y}_i$  — средние экспериментальные значения;  $y_{ip}$  — расчетные значения;  $N$  — число экспериментальных точек;  $L$  — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии);  $S_{воспр}^2$  — дисперсия воспроизводимости:

$$S_{воспр}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^m (y_{in} - \bar{y}_i)^2}{(m - 1)N}$$

где  $y_{in}$  — величина функции в 4-м параллельном опыте;  $\bar{y}_i$  — среднее значение по  $m$  параллельным опытам;  $N$  — число опытов, лет.

В нашем случае  $S_{ад}^2 = 0,0252$ ,  $S_{воспр}^2 = 0,016$ ,  $F_{табл} = 4,4$ ,  $F = 15,6$ , т.е. модель адекватно описывает экспериментальные данные.

Из табл. 4 видно, что имеется точка перегиба у данной зависимости ( $X_8, X_{18}$  — соответственно 740 и 33). Это подтверждает закон толерантности [5], согласно которому жизнедеятельность растений может лимитироваться как недостаточной, так и избыточной величиной факторов.

Дальнейшее увеличение точности описания моделей радиального прироста возможно путем введения других факторов, определяющих его величину.

Перспективным представляется использование физико-статистических моделей, отражающих механизм протекания процессов при росте дерева.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М., 1978.
2. Петров Е.Г. Водный режим и продуктивность лесных фитоценозов на почвах атмосферного увлажнения. Мн., 1983.
3. Русаленко А.И. Годичный прирост деревьев и влагообеспеченность. Мн., 1986.
4. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивность агроэкосистем. Л., 1981.
5. Хржановский В.Г., Викторов В.С., Литвак П.В., Родионов Б.С. Ботаническая география с основами экологии растений. М., 1986.