

УДК 630\*561.26

**П.М. Мазуркин, А.О. Попова**

Марийский государственный технический университет

Мазуркин Петр Матвеевич родился в 1946 г., окончил в 1968 г. Марийский политехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой природообустройства Марийского государственного технического университета, заслуженный деятель науки и техники Республики Марий Эл, академик РАЕ и РАЕН. Имеет 920 печатных работ в области экологической оценки территорий по свойствам деревьев и их популяций, а также долговременным результатам лесозаготовок.

E-mail: [kaf\\_po@mail.ru](mailto:kaf_po@mail.ru)



Попова Анна Олеговна родилась в 1984 г., окончила в 2006 г. Марийский государственный технический университет, ассистент кафедры природообустройства МарГТУ, аспирант. Имеет 3 печатные работы в области экологической оценки территорий по свойствам хвой ели.

E-mail: [kaf\\_po@mail.ru](mailto:kaf_po@mail.ru)



## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МУТОВОК ЕЛИ

На конкретном примере показана методика идентификации закономерностей роста ели в прошлом, основанная на замерах прироста мутовок и расстояний между ними сверху вниз, начиная от терминального побега.

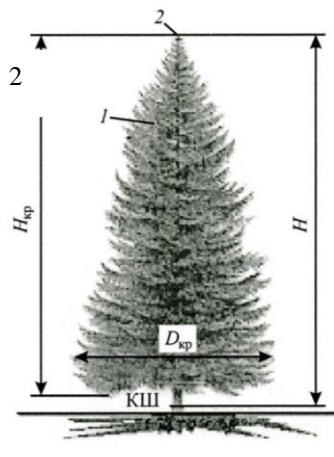
*Ключевые слова:* ель, мутовки, прирост ствола, поведение в прошлом.

Известные способы анализа древесного ствола [1, 6] не предусматривают исследования кроны, например, по измерениям мутовок у модельных деревьев ели. Цель нашей статьи – разработать способ анализа стволов ели с кронами и на этой основе изложить методику оценки экологического качества лесной или иной среды.

На рис. 1 показаны параметры ели, измеряемые в лесной таксации:  $kш$  – корневая шейка;  $D_{кр}$  – диаметр кроны, м;  $H_{кр}$  – протяженность кроны, м;  $H$  – высота дерева от корневой шейки до макушки терминального побега, м;  $l$  – крона учетного или модельного дерева ели;  $2$  – терминальный побег. На рис. 2 представлено расположение кроны в новой системе координат, когда нуль ставится на макушке терминального побега, а ось ретроспективного времени располагается сверху вниз до последней мутовки ветвей и сучьев на границе с бессучковой зоной ствола. Здесь появляются новые параметры:  $H_m$  – переменная высота от корневой шейки ствола по мутовкам до вершины терминального побега, м;  $Z_H$  – годичный прирост ствола ели по мутовкам от терминального побега до начала бессучковой зоны ствола, м. На рис. 3 приведена фотография молодой ели с дополнительным указанием рангов мутовок ( $r$ ), причем терминальный побег получает нулевой ранг.

Способ анализа кроны ели реализуется, например в ельнике, следующим образом. Закладывают пробную площадку, отбирают модельные деревья ели по внешним признакам. Измеряют таксационные показатели кроны 1 и указывают расположение терминального побега 2. Стволы спиливают около корневой шейки, измеряют расстояния до начала кроны и другие таксационные показатели. Затем обрубая сучья, сохраняя основания мутовок и вершины терминального побега. Все измерения записывают в журнал, показывая ранг расположения мутовок сверху вниз ствола от терминального побега. Затем стволы разделяют известными способами [1, 6].

В камеральных условиях анализ стволов от корневой шейки до начала кроны дополняют анализом от верхушки терминального побега по мутовкам ветвей. Измеряя переменную высоту от корневой



шейки

Рис. 1. Существующий способ таксации дерева

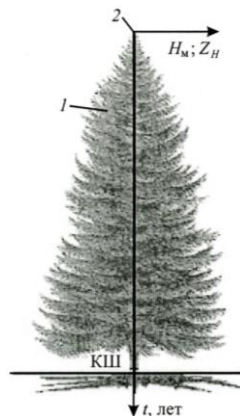


Рис. 2. Предлагаемый способ измерения ели

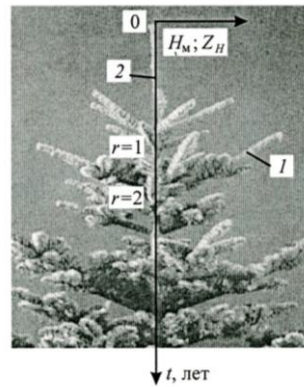


Рис. 3. Измерение ели по рангам мутовок

до каждой мутовки кроны, статистическим моделированием [2–5] выявляют рост модельного дерева ели в биологическом времени, а по расстояниям между мутовками от терминального побега ели до начала кроны – прирост в высоту в ходе ретроспективного времени, от момента проведения измерений до возраста ветвей.

Примеры. В работе [7] приведены измеренные параметры кроны ели разных классов роста. В таблице даны результаты моделирования по методике [3] высоты  $H_m$  расположения мутовки в зависимости от ее ранга  $r$  для ели первого класса роста.

При  $r = 0$  начало координат располагается на макушке терминального побега, тогда ось абсцисс совпадает с потоком ассимилятов.

Для первого класса роста дерева ели получена модель (рис. 4)

$$H_m = 20,569 \exp(-0,00001245r^{2,8444}) - 0,6202r^{0,9549}. \quad (1)$$

Коэффициент приспособляемости  $k$  [2] учтен с отрицательным знаком, что характеризует кризисный процесс влияния внешней среды на дерево по первой естественной составляющей (1). По закону гибели поток питательных веществ идет сверху вниз почти равномерно. Этому мешает растущий кризис поставки питательных веществ. Аналогичные модели получены по другим классам роста. Возраст ели по мутовкам  $t = r + 1$ . Тогда рост дерева в высоту определяется уравнением

$$H_M = H \exp(-a_1(t-1)^{a_2}) - a_3(t-1)^{a_4} \exp(-a_5(t-1)^{a_6}), \quad (2)$$

где  $t$  – ретроспективный возраст дерева ели, начиная с возраста терминального побега при условии  $t = 0$ ;

$a_1, \dots, a_6$  – параметры модели, зависящие от формы ствола и структуры кроны по расположению мутовок у конкретного дерева и вычисляемые по высоте мутовки и ее порядковому номеру, начиная от терминального побега.

**Высота расположения мутовки, м**

Ранг мутовки $r$	Факт $\hat{H}_M$	Расчетные значения по (1)			Составляющие (1)		Приспособляемость $-k$
		$H_M$	$\varepsilon$	$\Delta, \%$	$H_1$	$H_2$	
0	20,53	20,57	-0,04	-0,19	20,57	0,00	0,00
1	20,02	19,95	0,07	0,35	20,57	0,62	0,03
2	19,50	19,36	0,14	0,72	20,57	1,21	0,06
3	18,83	18,79	-0,26	-1,38	20,56	1,77	0,09
4	18,20	18,23	-0,03	-0,16	20,56	2,33	0,11
5	17,63	17,66	-0,03	-0,17	20,54	2,88	0,14
6	17,15	17,09	0,06	0,36	20,53	3,44	0,17
7	16,66	16,53	0,13	0,78	20,50	3,97	0,19
8	16,16	15,96	0,20	1,24	20,47	4,51	0,22
9	15,45	15,38	0,07	0,45	20,44	5,06	0,25
10	14,72	14,80	-0,08	-0,54	20,39	5,59	0,27
11	14,04	14,21	-0,17	-1,21	20,34	6,13	0,30
12	13,50	13,62	-0,12	-0,89	20,27	6,65	0,33
13	12,99	13,01	-0,02	-0,15	20,19	7,18	0,36
14	12,29	12,40	-0,11	-0,90	20,11	7,71	0,38
15	11,72	11,78	-0,06	-0,51	20,01	8,23	0,41
16	11,03	11,14	-0,11	-1,00	19,90	8,76	0,44
17	10,80	10,50	0,30	2,78	19,78	9,28	0,47
18	9,95	9,84	0,11	1,11	19,64	9,80	0,50
19	9,28	9,17	0,11	1,19	19,49	10,32	0,53
20	8,52	8,49	0,03	0,35	19,32	10,83	0,56
21	7,68	7,79	-0,11	-1,43	19,14	11,35	0,59
22	7,00	7,08	-0,08	-1,14	18,95	11,87	0,63

Годичный прирост  $Z_H$  ствола ели первого класса роста определяется сложным уравнением, содержащим семь составляющих. При этом в про-

шлом, 17 лет назад, произошло резкое снижение прироста между мутовками (рис. 4).

Вначале резко выделяющуюся точку исключают и получают тренд (рис. 5) (первые две части) с волновой адаптацией ели по уравнению

$$Z_H = 0,49557 \exp(0,078460 \cdot 0,82723^r) - 0,0019819 \cdot 2,39904 \exp(-0,079592 \cdot 0,99904^r) + A \cos(\pi r / p - 0,45201);$$

$$A = 124,3819 r^{-3,13020} \exp(-8,08701 r^{0,23853}); p = 6,82675 - 0,28175 r^{0,99606}, \quad (3)$$

где  $A, p$  – соответственно амплитуда и период колебаний.

Отличие от формулы (1) заключается в положительной ретроспективной волновой динамике прироста. Иначе говоря, со снижением высоты мутовки  $H_m$  увеличивается прирост ствола  $Z_H$  к раннему возрасту дерева ели. Но самые первые ветви отмерли, даже сучья отпали и заросли корой и древесиной. Поэтому тенденция по двум первым частям формулы (3) про-

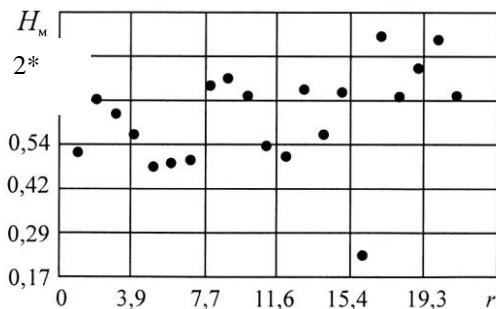


Рис. 4. Расстояние между мутовками, или годичный прирост ствола ели в зависимости от ранга мутовки. Здесь и далее для построения графиков использована программная среда Curve Expert 1.3

должится только со 2-го ранга.

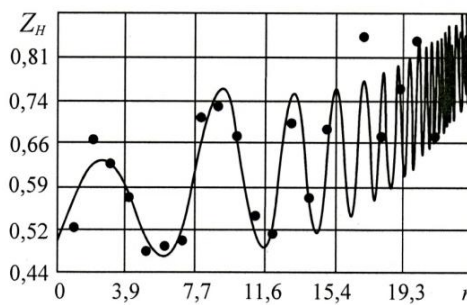


Рис. 5. Рой точек и график прироста ствола ели в высоту в зависимости от ранга мутовки без резко отклоняющейся одной точки на рис. 4. Здесь и далее  $s$  – среднее квадратическое отклонение,  $s = 0,0717$ ;  $r$  – коэффициент корреляции,  $r = 0,9384$

Третья составляющая формулы (3), как видно при рассмотрении графика на рис. 5 справа налево, показывает не только снижение прироста по высоте между мутовками, но и колебательную адаптацию дерева к окружающей среде. Частота колебательного возмущения постепенно уменьшается, наблюдаются плавные изменения прироста в высоту, что свидетельствует об относительно комфортных условиях для данной ели первого класса роста.

Таким образом, появляется возможность биометрического обоснования классов роста и в дальнейшем отказа от такой группировки. После формулы (3) с возвратом ранее исключенной точки получен график на рис. 6.

График четвертой составляющей (второй составляющей волнового колебательного возмущения организма на внешние воздействия) представлен уравнением вейвлет-функции П.М. Мазуркина [3]:

$$Z_{H4} = A_2 \cos(\pi r / p_2 + 5,83322);$$

$$A_2 = 8,75520 \cdot 10^{-148} r^{186,52894} \exp(-11,21723r); p_2 = 15,97970 - 0,67366r. \quad (4)$$

Амплитуда колебания  $A_2$  изменяется по биотехническому закону, как в предыдущих формулах, т. е. показывает стрессовое возбуждение модельного дерева на внешние раздражители.

Рис. 6. График четвертой составляющей статистической закономерности (4), показывающий волновую адаптацию изучаемого дерева ели к условиям места произрастания с учетом кризисного года 16-летней давности ( $s = 0,0512$ ;  $r = 0,9006$ )

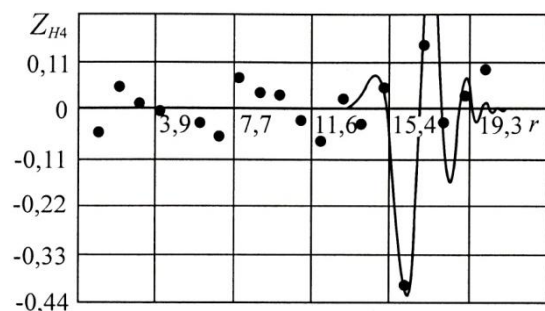
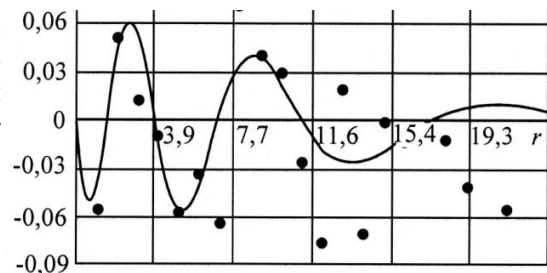


Рис. 7. График пятой составляющей волновой адаптации модельного дерева ели к условиям роста и развития за последние 17 лет жизни до рубки как модели кругляка ( $s = 0,0407$ ;  $r = 0,5877$ )



Импульсное изменение прироста в высоту произошло в течение 6 лет, от времени 20 лет назад ( $r = 19$ ) до 14 лет ( $r = 13$ ). За эти годы три положительных изменения прироста (сверху оси абсцисс) сменялись двумя отрицательными приростами (снизу оси абсцисс), причем один импульсивный кризис оказался наибольшим по амплитуде. Этот график будет вейвлет-функцией тогда, когда площади в верхней и нижней частях от оси абсцисс окажутся равными. Из-за биотехнического изменения амплитуды и периода колебательного возмущения ели вейвлет-функция будет асимметричной. Этот признак присущ не обычным сигналам (симметричным импульсам), а сигналам только от живого вещества.

Дальнейшие 14 лет ель росла и развивалась спокойно, как видно по точкам на рис. 6 (справа налево). Это означает, что дерево преодолело кризисный период.

Согласно графику на рис. 7 наступила новая волна возмущения с учащающейся частотой и нарастающей амплитудой (смотреть справа налево). Хотя амплитуда колебания достигла всего  $\pm 6$  см, но еще неизвестно,

что могло бы произойти в дальнейшем, если бы модельное дерево стало учетным и в будущем его измеряли геодезическими приборами с точностью  $\pm (1 \dots 3)$  мм. Но существование дерева как модели было прервано. Уравнение этого незавершенного колебания имеет вид (см. рис. 7)

$$Z_{H5} = A_3 \cos(\pi r / p_3 - 4,05120);$$

$$A_3 = 0,060977r^{0,34086} \exp(-0,13164r); p_3 = 1,72324 + 0,10831r. \quad (5)$$

С гораздо меньшей (в 10 раз) по сравнению с показанной на рис. 6 амплитудой в период с 16 до 6 лет назад произошло другое сигнальное изменение прироста в высоту по мутовкам 5–15 по формуле вида (рис. 8)

$$Z_{H6} = A_4 \cos(\pi r / p_4 - 6,22270);$$

$$A_4 = 1,79661 \cdot 10^{-6} r^{9,30239} \exp(-1,16257r); p_4 = 0,95088 + 0,058636r. \quad (6)$$

Если бы эти колебания можно было сопоставить с климатическими измерениями, а также регистрацией явлений и процессов на месте произрастания ели, то вполне стало бы реально указать причины появления тех или иных асимметричных вейвлет-сигналов. График на рис. 8 показывает, что четыре года назад до рубки изучаемое дерево успешно преодолело это малое волнение физиологических процессов.

Рис. 8. График шестой составляющей биотехнической закономерности, показывающей волновую адаптацию модельного дерева ели по приросту ствола в ретроспективе 5 ... 14 лет ( $s = 0,0375$ ;  $r = 0,3245$ )

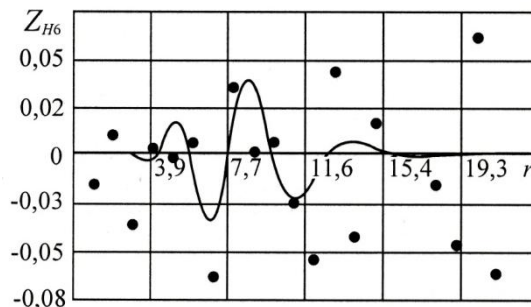
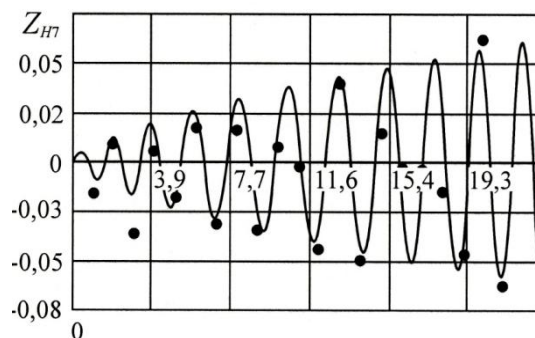


Рис. 9. График убывающей к терминальному побегу волновой адаптации по седьмой составляющей искомой закономерности за весь возраст дерева ели, включая отпавшие мутовки в бессучковой зоне ствола ( $s = 0,0170$ ;  $r = 0,8992$ )



Все частичные колебания остались позади за ретроспективное время в 23 года (от ранга 22), которое является возрастом кроны. А возраст самого дерева гораздо больше, но об этом в источнике [7] мы не нашли сведений. Таким образом, крона ели имеет свой собственный возраст, меняющийся в ходе жизнедеятельности дерева в зависимости от условий произрастания.

О возрасте кроны свидетельствует график на рис. 9, из которого видно убывающее колебание (справа налево в биологическом времени) прироста ствола в высоту. Это почти мистическое для нас 23-летнее явление из-за сходства крайних точек волны с формой кроны ели характеризуется уравнением

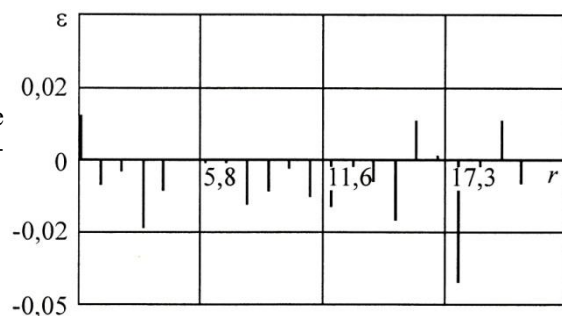
$$Z_{H7} = A_5 \cos(\pi r / p_5 - 1,67400);$$

$$A_5 = 0,0087988^{0,62970}; p_5 = 0,71475 + 0,026519^{1,28863} \exp(-0,064398^{0,99442}). \quad (7)$$

Вполне может оказаться, что такое колебательное возмущение в ретроспективное время продолжится до начала жизни дерева (проростка). Дело в том, что почти до 30-летнего возраста ельника наблюдаются затухающие колебания таксационных показателей в процессе адаптации популяции к условиям произрастания, и только после этого можно с уверенностью назвать деревья-лидеры. Человек меняет условия своего обитания так быстро и фундаментально, что деревья ели за почти 350 млн лет своей эволюции просто не успели привыкнуть к революционным изменениям во внешней среде.

Разница между фактическими и расчетными значениями изучаемого показателя приведена на рис. 10. Они уже почти равны ошибке измерений в 0,01 м, поэтому смещение точек вниз показывает только необходимость «встряски» всех составляющих готовой математической модели из семи составляющих для повышения ее точности.

Рис. 10. Остатки или абсолютные погрешности статистической модели прироста ели по мутовкам сверху вниз



Таким образом, все семь составляющих одной общей формулы поведения ели были идентифицированы по замерам расположения мутовок на стволе. Это дает уверенность, что на учетных деревьях можно проводить мониторинг окружающей среды на возраст кроны даже одной единственной ели, растущей на данной территории сельской или городской местности.

Для ели любого класса роста применима общая формула

$$Z_H = Z_{H1} + Z_{H2} + Z_{H3} + Z_{H4} + Z_{H5} + Z_{H6} + Z_{H7}, \quad (8)$$

где  $Z_H$  – годичный прирост в высоту, начиная с года проведения измерений вглубь ретроспективного биологического времени дерева, м;

$Z_{H1}, \dots, Z_{H7}$  – составляющие прироста ствола по мутовкам в системе координат с началом от макушки терминального побега до корневой шейки, м,



$$Z_{H1} = Z_0 \exp(a_1 r^{a_2}); Z_{H2} = -a_3 r^{a_4} \exp(-a_5 r^{a_6});$$

$$Z_{H3} = A_1 \cos(\pi r / p_1 - a_{14}); A_1 = a_7 r^{a_8} \exp(-a_9 r^{a_{10}}); p_1 = a_{11} \pm a_{12} r^{a_{13}};$$

$$Z_{H4} = A_2 \cos(\pi r / p_2 \pm a_{22}); A_2 = a_{15} r^{a_{16}} \exp(-a_{17} r^{a_{18}}); p_2 = a_{19} \pm a_{20} r^{a_{21}};$$

$$Z_{H5} = A_3 \cos(\pi r / p_3 \pm a_{30}); A_3 = a_{23} r^{a_{24}} \exp(-a_{25} r^{a_{26}}); p_3 = a_{27} \pm a_{28} r^{a_{29}};$$

$$Z_{H6} = A_4 \cos(\pi r / p_4 \pm a_{38}); A_4 = a_{31} r^{a_{32}} \exp(-a_{33} r^{a_{34}}); p_4 = a_{35} \pm a_{36} r^{a_{37}};$$

$$Z_{H7} = A_5 \cos(\pi r / p_5 \pm a_{46}); A_5 = a_{39} r^{a_{40}}; p_5 = a_{41} \pm a_{42} r^{a_{43}} \exp(-a_{44} r^{a_{45}});$$

$Z_0$  – прирост терминального побега за текущий год, м;

$a_1, \dots, a_{46}$  – параметры, вычисляемые по измерениям мутовок ели и показывающие частичные процессы адаптации к условиям роста ствола в биологическом времени от проростка ели до рубки;

$r$  – ранг (номер) мутовки при счете сверху вниз; для терминального побега при измерениях в конце осени или начале зимы  $r = 0$ , а для первой от него мутовки  $r = 1$ ;

$A_1$  – амплитуда (половина) колебательного возмущения прироста верхушки модельного дерева за последние несколько лет, м;

$p_1$  – половина периода колебания прироста верхушки за эти же годы, лет;

$A_2, \dots, A_4$  – амплитуды (половины) колебания прироста между мутовками модельного дерева за годы их существования, м;

$p_2, \dots, p_4$  – половина периода колебания прироста ствола между мутовками, лет;

$A_5$  – амплитуда колебания прироста ствола от терминального побега до корневой шейки с учетом отмерших ветвей, отпавших сучьев и заросших древесиной мутовок за весь период роста дерева, м;

$p_5$  – половина периода колебания прироста ели за это же время, лет.

Сущность способа заключается в том, что ретроспектива по простым измерениям роста и прироста ели по мутовкам, располагающимся на некротических секциях ствола, позволяет идентифицировать с помощью выявленных статистических закономерностей волновые процессы, происшедшие в жизни ели. Деревья этого вида легко адаптируются в городской среде, устойчивы в озеленении. Волновые возмущения в приросте по мутовкам показывают адаптацию породы к окружающей среде.

Выявление статистических закономерностей роста ели позволит управлять лесными плантациями этой породы, выращивать здоровые ельники, а также определять экологические пределы их выносливости. Положительный эффект заключается также в том, что измерения можно выполнять и на учетных деревьях, не проводя рубку моделей, а затем и вообще отказавшись от них при таксации ельников.

Новизной является измерение ствола тремя способами:



по снижению диаметров для технической оценки древесины ствола, что важно в таксации [6];

по увеличению диаметров для экологической оценки ельника и территорий, на которых произрастают исследуемые одиночные или групповые деревья ели в парках и культурных ландшафтах [6];

по расстояниям между мутовками, включая длину терминального побега.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анучин, Н.П.* Лесная таксация [Текст] / Н.П. Анучин. – Изд-е 5-е, доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – 552 с.
2. *Мазуркин, П.М.* Дендрометрия. Статистическое древоведение [Текст]: учеб. пособие. Ч. 1 / П.М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. – 308 с.; Ч. 2. – Там же. – 205 с.
3. *Мазуркин, П.М.* Математическое моделирование. Идентификация однофакторных статистических закономерностей [Текст]: учеб. пособие / П.М. Мазуркин, А.С. Филонов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 292 с.
4. *Мазуркин, П.М.* Основы научных исследований [Текст]: учеб. пособие / П.М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 412 с.
5. *Мазуркин, П.М.* Экологический мониторинг (способы испытания деревьев) [Текст]: учеб. пособие / П.М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – 224 с.
6. Пат. 2201593 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 N 33/46, A 01 G 23/00, A 01 G 23/02. Способ анализа древесного ствола [Текст] / П.М. Верхунов, П.М. Мазуркин (РФ); заявитель и патентообладатель Марийск. гос. техн. ун-т. – № 2001116223/13; заявл. 13.06.2001; опубл. 27.03.2003, Бюл. № 5.
7. *Старостин, В.А.* О распределении ветвей по толщине в кроне ели в лесных культурах [Текст] / В.А. Старостин // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТА, 1991. – С.105–109.

Поступила 30.05.08

*P.M. Mazurkin, A.O. Popova*  
Mari State Technical University

#### **Distribution Regularities of Spruce Verticils**

The identification method of spruce growth regularities in the past is shown on the concrete example based on the verticils' accretion measurements and distances between them top-down starting from the terminal sprout.

Keywords: spruce, verticils, stem accretion, growth in the past.

---