

УДК 630\*587.2:630\*521.2

**И. В. Толкач, О. С. Ожич, В. В. Коцан**

Белорусский государственный технологический университет

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВОСТОЕВ  
ПРИ АНАЛИТИКО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ДЕШИФРИРОВАНИИ**

В статье приведены результаты исследования взаимосвязей между таксационными показателями чистых модальных древостоев основных лесообразующих пород Республики Беларусь. В качестве исходного материала использована выборка данных глазомерно-измерительной таксации 701 840 таксационных выделов. Результаты регрессионного анализа показали, что наибольшее влияние на средний диаметр оказывают средняя высота, полнота, запас и возраст древостоев. Для оценки сумм площадей сечений и запасов нормальных древостоев (при полноте 1,0) использованы уравнения парабол третьего и четвертого порядков регрессии данных показателей со средней высотой, которые имеют близкие к единице коэффициенты детерминации, свидетельствующие о наличии тесных связей между показателями. Коэффициенты регрессии приведенных уравнений значимы по *t*-критерию Стьюдента на 5%-ном уровне значимости. Относительная ошибка регрессии не превышает 5%.

Разработанные регрессионные уравнения являются универсальными, путем их преобразований можно получить любой показатель на основе других. При этом используется одно уравнение для всех бонитетов или разрядов высот, а для различных пород меняются лишь коэффициенты. Они могут быть успешно использованы в автоматизированной системе дешифрирования вместо нормативных таблиц.

**Ключевые слова:** модальный древостой, взаимосвязь, таксационный показатель, регрессионный анализ, средний диаметр, сумма площадей сечений, запас, аналитико-измерительное дешифрирование.

**I. V. Tolkach, O. S. Ozhich, V. V. Kotsan**

Belarusian State Technological University

**THE USE OF REGRESSION MODELS  
FOR ASSESSING TAXATION INDICATORS OF STAND  
DURING ANALITICAL AND MEASURING INTERPRETATION**

The results of a study of the relationships between taxation indicators of pure modal stands of the main forest-forming species of the Republic of Belarus were presented at the article. As a source material, a sample of eye-measuring taxation data of 701 840 taxation units was used. The results of the regression analysis showed that the average height, completeness, stock and age of stands have the greatest influence on the average diameter. To estimate the sums of the cross-sectional areas and growing stock of normal stands (with a completeness of 1.0), the third and fourth-order parabolic equations of the regression of these indicators with average height were applied, which have determination coefficients close to unity, indicating the presence of close relationships between the indicators. The regression coefficients of the above equations are significant by the Student *t*-test at a 5% significance level. The relative error of the regression does not exceed 5%.

The developed regression equations are universal; by transforming them we can get any indicator based on others. In this case, one equation is used for all bonitets or discharges of heights, and for different species only coefficients change. They can be successfully used in an automated system instead of normative tables.

**Key words:** modal stand, relationship, taxation indicator, regression analysis, average diameter, sum of cross-section area, growing stock, analytical and measuring interpretation.

**Введение.** Устойчивое управление лесами невозможно без решения ряда технологических задач, одной из которых является совершенствование системы лесоустройства, повышение точности таксации и учета лесов с использованием современных информационных технологий. При этом необходима разработка новых

автоматизированных систем и методов инвентаризации лесного фонда, основывающихся на моделировании прогноза роста и актуализации данных [1].

Технологический прогресс в области аэро- и космической съемки позволяет постоянно увеличивать объем информации, получаемой

дистанционными методами, и повышать ее точность. В связи с этим большое значение приобретает разработка новых методов автоматизированного дешифрирования, основанных на использовании взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоев [2, 3].

Изучением закономерностей строения и взаимосвязей между дешифровочными показателями крон деревьев, таксационными показателями древостоя и его полога, разработкой регрессионных моделей и таблиц, отражающих данные взаимосвязи, занимались многие ученые: А. К. Пронин, Г. Г. Самойлович, И. Д. Дмитриев, И. М. Данилин, И. А. Лабутина, А. В. Любимов, В. И. Сухих, А. Н. Филипчук и многие другие. Накоплен большой опыт по исследованию данных взаимосвязей.

Целью работы стало изучение взаимосвязей между таксационными показателями чистых модальных древостоев основных лесообразующих пород Республики Беларусь, а также разработка регрессионных уравнений, отражающих данные взаимосвязи, и уравнений нормативных таблиц сумм площадей сечений, запасов и видовых чисел для их последующего использования в автоматизированной системе аналитико-измерительного дешифрирования древостоев с целью упрощения и повышения эффективности их использования.

**Основная часть.** В настоящее время существует множество исследований по изучению взаимосвязей между различными таксационными и дешифровочными показателями древостоев. Взаимосвязи между ними могут быть представлены как простыми связями, так и множественными регрессиями, учитывающими влияние 2–3 и более переменных. Например, взаимосвязь между средним диаметром, высотой и полнотой –  $D = f(H, P)$ , или средним диаметром, высотой, диаметром крон, сомкнутостью и классом бонитета –  $D = f(h, D_k, Sp, B)$ . Они могут оцениваться с помощью различных регрессионных уравнений или выражаться в виде графиков, таблиц, в том числе хода роста, дополненных дешифровочными показателями (высотой, средним диаметром крон, сомкнутостью полога, протяженностью крон, высотой до наибольшего диаметра кроны и др.) [4, 5].

Исследованию данных зависимостей для основных лесообразующих пород Республики Беларусь посвящена данная работа.

Различные нормативные таблицы, такие как стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов, бонитетов, разрядов высот, широко применяются в лесоустройстве и лесном хозяйстве для определения таксационных характери-

стик насаждений. Для их эффективного использования при расчете таксационных показателей древостоев были разработаны регрессионные уравнения, позволяющие заменить таблицы при выполнении вычислений.

**Объекты исследования.** Объектами исследования послужили чистые модальные древостои основных лесообразующих пород Республики Беларусь. В качестве исходных данных использованы материалы лесоустройства – выделенная база данных насаждений лесного фонда Беларуси. Для регрессионного анализа были отобраны 701 840 таксационных выделов.

Общие статистики распределений на примере средних диаметров древостоев в исследуемых насаждениях приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Общие статистики среднего диаметра для основных лесообразующих пород**

Порода	Количество объектов, шт.	Среднее значение, см	Стандартное отклонение, см	Коэффициент вариации, %	Минимальное значение, см
Сосна	572 185	23,54	5,67	24,08	10
Ель	21 206	23,98	7,09	29,55	10
Береза	59 440	17,59	5,85	33,27	10
Осина	2 252	22,87	8,21	35,91	10
Ольха черная	42 122	20,39	5,54	27,19	10
Ольха серая	71	23,72	11,91	50,24	10
Дуб	4 564	34,78	12,65	36,37	10

**Результаты исследований.** Для обработки данных использовались методы регрессионного анализа и составлялись регрессионные уравнения взаимосвязи между таксационными показателями древостоев. Исследование зависимостей между таксационными показателями древостоя было выполнено отдельно для основных лесообразующих пород.

Многофакторный регрессионный анализ показал, что наибольшее влияние на средний диаметр древостоя оказывает средняя высота, полнота, запас и возраст. Приведено регрессионное уравнение (1), которое отражает данную связь; параметры коэффициентов уравнений для вычисления среднего диаметра древостоев основных лесообразующих пород представлены в табл. 2.

$$D = c + a_1 \cdot H + a_2 \cdot P/H + a_3 \cdot M + a_4 \cdot A, \quad (1)$$

где  $D$  – средний диаметр древостоя, см;  $H$  – средняя высота древостоя, м;  $P$  – полнота древостоя;  $M$  – запас древостоя, м<sup>3</sup>/га;  $A$  – средний возраст древостоя, лет.

Анализ полученных данных показал, что подобраны наиболее значимые по  $t$ -критерию Стьюдента переменные для расчета средних диаметров древостоев основных лесообразующих пород. На тесные связи между средним диаметром, средней высотой, полнотой, запасом и возрастом древостоев указывают высокие коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) – 78,3–88,6%. С увеличением средней высоты и возраста древостоя происходит увеличение среднего диаметра в среднем на 1–2 см, а влияние запаса дает отрицательную регрессию.

Таблица 2  
Параметры регрессионных уравнений для вычисления среднего диаметра древостоев

Порода	Коэффициенты				
	$c$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Сосна	-0,0930	1,1734	-12,2123	-0,0169	0,0618
Ель	-6,1039	1,2426	42,1338	-0,0147	0,0918
Дуб	7,2621	0,6080	-143,606	-0,0130	0,2091
Береза	-6,7164	1,2129	44,9036	-0,0221	0,0930
Осина	-4,9380	1,1020	23,0754	-0,0267	0,2284
Ольха черная	-1,7034	1,0210	8,6679	-0,0116	0,1038
Ольха серая	-16,8853	1,3622	110,085	-0,0256	0,2804

Регрессионные уравнения зависимости класса бонитета (индекса класса бонитета) от возраста и средней высоты древостоя построены на основе бонитировочных таблиц профессора М. М. Орлова [6]. Для аппроксимации В. П. Машковским и И. В. Толкачем применена функция, предложенная Э. А. Митчерлихом [7], в которую введен дополнительный параметр, позволяющий учесть индекс класса бонитета.

Семенные насаждения:

$$H = -3,79246 + (1,73549 - e^{-0,021318 \cdot A})^{2,45297} \times (11,27416 - 1,17246 \cdot ИКВ); \quad (2)$$

порослевые насаждения:

$$H = -2,41987 + (1,16697 - e^{-0,0248226 \cdot A})^{1,24252} \times (32,5082 - 3,4923 \cdot ИКВ); \quad (3)$$

где  $H$  – средняя высота древостоя, м;  $A$  – средний возраст древостоя, лет;  $ИКВ$  – индекс класса бонитета.

Коэффициенты регрессии значимы по  $t$ -критерию Стьюдента на 5%-ном уровне значимости. Относительная ошибка регрессии не превышает 5%. Коэффициент детерминации составляет 98–99%. Полученные уравнения могут применяться в виде модели на ЭВМ для определения высоты древостоя при известном среднем возрасте и классе бонитета, а также для определения индекса класса бонитета в зависимости от средней высоты и среднего возраста древостоя с последующим преобразованием в класс бонитета.

Индексы классов бонитета приняты следующим образом: для первого класса бонитета – 1, для следующих классов добавляется или вычитается единица. В качестве индекса класса бонитета можно использовать индексы, предложенные профессором О. А. Атрошенко, высоты семенных древостоев в возрасте 100 лет и порослевых в возрасте 50 лет ( $H_{100}$ ,  $H_{50}$ ).

Для оценки сумм площадей сечений и запасов нормальных древостоев применяются стандартные таблицы [8], на основе которых оцениваются также полноты и запасы таксируемых древостоев. В качестве регрессионных уравнений связей сумм площадей сечений для полноты 1,0 и запасов нормальных древостоев с высотой применены параболы третьего и четвертого порядков:

$$G_n = c + a_1 \cdot H + a_2 \cdot H^2 + a_3 \cdot H^3, \quad (4)$$

$$M_n = c + a_1 \cdot H + a_2 \cdot H^2 + a_3 \cdot H^3 + a_4 \cdot H^4, \quad (5)$$

где  $G_n$  – сумма площадей сечений нормального древостоя, м<sup>2</sup>;  $M_n$  – запас нормального древостоя, м<sup>3</sup>;  $H$  – средняя высота древостоя, м.

Параметры уравнений для расчета этих таксационных показателей для основных лесообразующих пород приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3  
Параметры регрессионных уравнений для вычисления сумм площадей сечений нормальных древостоев

Порода	Коэффициенты			
	$c$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Сосна	3,4709	3,5964	-0,1274	0,0016
Ель	-0,6896	3,3437	-0,0826	0,0008
Дуб	3,8245	2,0145	-0,0387	0,0003
Береза	6,0969	1,4938	-0,0248	0,0003
Осина	0,5828	2,4333	-0,0567	0,0006
Ольха черная	1,7634	1,7901	-0,0017	-0,0005

Таблица 4  
**Параметры регрессионных уравнений  
 для вычисления запасов нормальных древостоев**

Порода	Коэффициенты				
	$c$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Сосна	3,8274	5,8038	1,3252	-0,0504	0,0007
Ель	-32,874	12,586	0,4965	-0,0056	-
Дуб	-3,7296	6,1238	0,584	-0,0062	-
Береза	-14,244	10,239	0,1775	-	-
Осина	-20,976	9,1445	0,3562	-0,0019	-
Ольха черная	16,992	-2,1226	1,2047	-0,0174	-

Все коэффициенты регрессии приведенных уравнений значимы по  $t$ -критерию Стьюдента на 5%-ном уровне значимости. Относительная ошибка регрессии не превышает 5%. Коэффициент детерминации составляет 99–100%.

**Заключение.** Полученные результаты исследования взаимосвязей между таксационными показателями древостоев основных лесобразующих пород позволяют сделать вывод, что существует тесная связь между средним диаметром, средней высотой, полнотой, запасом и возрастом древостоев, на это указывают высокие коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) – 78,3–

88,6%. Разработанные регрессионные уравнения дают возможность оценить (моделировать) средний диаметр древостоя, который нельзя получить путем прямых измерений видимых на снимках крон деревьев и полога древостоя.

Для оценки сумм площадей сечений и запасов нормальных древостоев (при полноте 1,0) использованы уравнения парабол третьего и четвертого порядков регрессии данных показателей со средней высотой, которые имеют близкие к единице коэффициенты детерминации, свидетельствующие о наличии тесных связей между показателями, и могут быть успешно использованы в автоматизированной системе дешифрирования вместо нормативных таблиц.

Разработанные регрессионные уравнения являются универсальными, путем их преобразований можно получить любой показатель на основе других. При этом используется одно уравнение для всех бонитетов или разрядов высот, а для различных пород меняются лишь коэффициенты. Необходимо отметить, что вычисленные по данным уравнениям значения несколько отличаются от табличных, приведенных в первоисточниках, так как таблицы имеют некоторую ступенчатость из-за округления показателей до целых значений.

#### Список литературы

1. Зорин В. П. Система и методы инвентаризации лесного фонда на основе информационных технологий, обеспечивающих устойчивое управление лесами // Труды БГТУ. 2016. № 1: Лесное хоз-во. С. 5–8.
2. Бахур О. С. Взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями в сосновых древостоях I и Ia классов бонитета // Труды БГТУ. 2013. № 1: Лесное хоз-во. С. 13–15.
3. Толкач И. В., Бахур О. С. Измерительное дешифрирование и оценка таксационных показателей сосновых древостоев по цифровым снимкам сверхвысокого разрешения // Труды БГТУ. 2014. № 1: Лесное хоз-во. С. 48–51.
4. Сухих В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.
5. Коцан В. В. Взаимосвязи между таксационными показателями деревьев в кругах конкуренции на примере сосняков мшистых искусственного происхождения // Труды БГТУ. 2014. № 1: Лесное хоз-во. С. 19–22.
6. Орлов М. М. Лесная таксация. Л.: Изд-во журн. «Лесн. хоз-во и лесн. пром-сть», 1929. 532 с.
7. Машковский В. П., Толкач И. В. Система кривых для аппроксимации связи высот и диаметров в разрядных таблицах // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 1996. Вып. 3. С. 71–74.
8. Технические требования при лесоустройстве. Отвод и таксация лесосек в лесах Республики Беларусь: ТКП 622-2018 (33090). Введ. 12.07.2018. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2018. 96 с.

#### References

1. Zorin V. P. The system and methods of forest fund inventory on the bases of information technologies providing sustainable forest management. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry, pp. 5–8 (In Russian).
2. Bakhur O. S. Relationships between taxation and decoding indicators in pine stands of I and Ia grade bonitets. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 1: Forestry, pp. 13–15 (In Russian).
3. Tolkach I. V., Bakhur O. S. Measuring interpretation and assessment of taxation indicators of pine stands using digital images of ultra-high resolution. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 1: Forestry, pp. 48–51 (In Russian).

4. Sukhikh V. I. *Aerokosmicheskie metody v lesnom khozyaystve i landshaftnom stroitel'stve* [Aero-space methods in forestry and landscape construction]. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2005. 392 p.

5. Kotsan V. V. Interconnections between taxation indicators of trees in competition circles on the example of mossy pine forests of artificial origin. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 1: Forestry, pp. 19–22 (In Russian).

6. Orlov M. M. *Lesnaya taksatsyia* [Forest taxation]. Leningrad, Publishing House of Journal "Forestry and Forestry Industry", 1929. 532 p.

7. Mashkovsky V. P., Tolkach I. V. Curve system for approximating the relationship of heights and diameters in bit tables. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], Series 1, Forestry, 1996, issue 3, pp. 71–74 (In Russian).

8. ТКР 622-2018 (33090). Technical requirements in forest management. The allocation and inventory of cutting areas in conducting forest management activities in the forests of the Republic of Belarus. Minsk, Ministry of forestry of the Republic of Belarus Publ., 2018. 96 p. (In Russian).

#### Информация об авторах

**Толкач Игорь Владимирович** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

**Ожич Ольга Светославовна** – кандидат сельскохозяйственных наук, ассистент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: bakhur@belstu.by

**Коцан Владимир Васильевич** – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: wolodia250@belstu.by

#### Information about the authors

**Tolkach Igor' Vladimirovich** – PhD (Agriculture), Assistant Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

**Ozhich Olga Svetoslavovna** – PhD (Agriculture), Assistant Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bakhur@belstu.by

**Kotsan Vladimir Vasil'yevich** – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: wolodia250@belstu.by

Поступила 31.03.2020