

Результаты экспериментальных исследований программного определения объема партии листовых лесоматериалов

О.А. Куницкая^{1а}, Н.Л. Беляев^{2b}, Е.Г. Хитров^{3с}, О.А. Пузанова^{4d}

¹ Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия

² Timbeter OÜ, Teaduspargi 3/1, Таллин, Эстония

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^а ola.ola07@mail.ru, ^б n_beliaev@mail.ru, ^с yegorkhitrov@mail.ru, ^д puzanova-olga@rambler.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-3406-5411>,

^с <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>, ^д <https://orcid.org/0000-0001-9681-5041>

Статья поступила 10.01.2022, принята 02.02.2022

Проблема повышения точности и автоматизации учета круглых лесоматериалов по-прежнему стоит достаточно остро. В отечественной и зарубежной практике используются различные методы ручного поштучного измерения объема как с учетом, так и без учета коры. К ним относятся методы концевых сечений, срединного сечения, усеченного конуса. В то же время, все активнее используются автоматизированные методы, чаще всего секционный. Развиваются и групповые методы определения объема. В дополнение к ручному штабельному методу в учетной практике применяются весовые методы, построение 2-D и 3-D моделей на базе фотографической и лазерной съемки. Однако весьма часто отсутствует нормативное регулирование вопросов учета лесоматериалов — какой метод и когда применять, какие погрешности измерений допустимы, что делать с расхождениями и т. п. К настоящему времени разработаны пакеты прикладных программ, основанные на машинном зрении, которые позволяют существенно сократить трудоемкость операций по измерению объемов круглых лесоматериалов в плотном штабеле или на автолесовозе. В статье показано, что при программном определении объема хвойных лесоматериалов непосредственные оценки завышены по сравнению с контрольными. Распределение относительных отклонений оценок от контрольных значений не подчиняется нормальному закону распределения. В результате анализа выборки партий листовых лесоматериалов получена регрессионная модель, предназначенная для корректировки программной оценки объема партии с учетом объема, среднего диаметра и числа бревен. Использование данной модели позволяет повысить точность программной оценки по сравнению с контролем. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета.

Ключевые слова: лесозаготовки; учет заготовленной древесины; круглые лесоматериалы; групповой учет; сортаменты.

Results of experimental studies of the program definition of the volume of deciduous timber

O.A. Kunitskaya^{1а}, N.L. Belyaev^{2b}, E.G. Khitrov^{3с}, O.F. Puzanova^{4d}

¹ Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha

² Timbeter OÜ, Teaduspargi 3/1, Tallin, Estonia

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia

⁴ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^а ola.ola07@mail.ru, ^б n_beliaev@mail.ru, ^с yegorkhitrov@mail.ru, ^д puzanova-olga@rambler.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-3406-5411>,

^с <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>, ^д <https://orcid.org/0000-0001-9681-5041>

Received 10.01.2022, accepted 02.02.2022

The problem of increasing the accuracy and automation of round timber accounting is still quite acute. In domestic and foreign practice, various manual piece-by-piece methods of volume measurement are used, both with and without taking bark into account. These include the method of end sections, the middle section method, and the truncated cone method. At the same time, automated methods, most often sectional methods, are used more and more often. Group methods for determining volume are also developing. In addition to the manual stacking method, accounting practice uses weight methods, construction of 2-D and 3-D models on the basis of photographic and laser surveying. However, quite often there is no normative regulation of the issues of timber accounting: which method and when to use, what measurement errors are acceptable, what to do with discrepancies, etc. To date, application software packages based on machine vision have been developed to substantially reduce the labor intensity of operations to measure the volume of round timber in a dense stack or on a timber hauler. The article shows that the direct estimates of coniferous timber volumes are overestimated compared with the reference ones. The distribution of relative deviations of estimates from the reference values does not follow the normal distribution law. As a result of the analysis of the sample of hardwood parties, a regression model has been obtained, designed to adjust the software assessment of the volume of the batch, taking into account the volume, mean diameter and the number of logs. The

use of this model makes it possible to improve the accuracy of the program rating compared to the control. The work was performed within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry" of the Arctic State Agrotechnological University.

Keywords: logging; logging accounting; roundwood; group accounting; assortments.

Введение. Во многих зарубежных странах практикуется сквозной процесс учета древесины, основанный на измерении заготовленных сортиментов харвестерами или процессорами. Эти машины автоматически производят измерение объема каждого заготовленного сортимента с одновременным учетом его породы и назначений, введенных оператором, и записывают данные измерений в бортовой компьютер. Данные измерений затем передаются онлайн или на физическом носителе в контору лесозаготовительного предприятия и служат основой для расчета производительности машин, оплаты операторам и последующей логистики заготовленной древесины [1–5].

К сожалению, в РФ такая практика не используется из-за отсутствия ряда необходимых нормативных документов, включая ГОСТ на мерную вилку для харвестера.

Наиболее динамично в России развиваются технологии группового учета плотно уложенных круглых лесоматериалов при помощи фотографии и ее последующей оцифровки системами машинного зрения [6]. Тот же принцип используется и в древесно-подготовительных цехах деревоперерабатывающих предприятий [7].

Групповые методы измерений, такие как штабельный, «подстроены» под опорный метод измерений путем использования коэффициентов полнодревесности, применяемых к геометрическому (так называемому складочному) объему группы сортиментов (штабеля) для получения плотного объема, т. е. эквивалента суммы объемов всех составляющих штабель сортиментов, найденных опорным методом [8–12].

Уровень развития современных информационных технологий позволяет автоматизировать процесс определения объема партии лесоматериалов. Известная программа *Timbeter* точно идентифицирует на снимке видимые торцы лесоматериалов и с учетом масштабирования определяет их площади и диаметры без учета коры. Далее на основе полученных данных по формуле объема цилиндра производится расчет объема партии. Для краткости далее по тексту будем называть такую методику «методикой программного определения».

Основная цель экспериментальных исследований — совершенствование методики программного определения объема партии лесоматериалов, повышение точности результатов ее применения. Нами выдвинуто предположение о том, что ошибка программного определения объема партии лесоматериалов складывается из двух составляющих — случайная ошибка, связанная с погрешностью измерений и обработки снимков, и систематическая ошибка, связанная с действием факторов, не учтенных существующей методикой определения объема партии по снимку.

Будем рассматривать листовые лесоматериалы отдельно, поскольку систематическая ошибка, предположительно, обусловлена главным образом геометрическими параметрами бревен (такими, как сбеги и закомлеванность), значительно различающимися у листовых и хвойных лесоматериалов.

В результате выполненных экспериментов были определены следующие величины: число бревен в партии $n^{\text{прогр}}$ (определено с помощью программы *Timbeter*); объем партии бревен $V^{\text{прогр}}$ (определен по формуле объема цилиндра с помощью программы *Timbeter*); средний диаметр бревен на снимке (определен с помощью программы *Timbeter*); контрольное число бревен $n^{\text{контр}}$ (ручной пересчет); контрольный объем партии бревен $V^{\text{контр}}$ (ручной обмер).

Контрольный объем партии бревен $V^{\text{контр}}$, определенный поштучным обмером, будем считать эталонным. По полученным данным рассчитано относительное отклонение объема партии, определенного программно, от контрольного значения:

$$\delta = \frac{V^{\text{прогр}} - V^{\text{контр}}}{V^{\text{контр}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Задача состоит в снижении отклонения δ и будет решаться с использованием методов регрессионного анализа [13–17]. Всего изучено 4 выборки (1 основная выборка + 3 контрольных), общие сведения о выборках приведены в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментальные выборки лесоматериалов

№	Шифр	Лесоматериалы	Регион (федеральный округ)	Число партий
1	ЛО-1	Лиственные (береза)	Приволжский	289
2	ЛК-1	—	—	331
3	ЛК-2	—	—	364
4	ЛК-3	—	—	48

Основные статистические данные по выборке ЛО-1 (№ 1) приведены в табл. 2. На рис. 1 сопоставлены объемы партий по программе *Timbeter* и контрольные значения в выборке ЛО-1 (№ 1).

Предположим, что оценка объема партии лесоматериалов дается непосредственно лишь на основе замера

при помощи программы. При попытке аппроксимации контрольных значений функцией:

$$V^{\text{контр}} = V^{\text{прогр}}, \quad (2)$$

получим оценку точности приближения по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (V_i^{\text{контр}} - V_i^{\text{прогр}})^2}{\sum_{i=1}^N (V_i^{\text{контр}} - V_{\text{ср}}^{\text{контр}})^2} \quad (3)$$

где $V_{\text{ср}}^{\text{контр}}$ — среднее значение контрольного объема партии лесоматериалов в выборке; индекс i соответствует номеру партии лесоматериалов в выборке.

Таблица 2. Статистические данные по выборке ЛЮ-1 (№ 1)

Показатель	$n^{\text{прогр}}, \text{шт.}$	$d_{\text{ср}}^{\text{прогр}}, \text{см}$	$V^{\text{прогр}}, \text{м}^3$	$n^{\text{контр}}, \text{шт.}$	$V^{\text{контр}}, \text{м}^3$	$\delta, \%$
N	289	289	289	289	289	289
M	61,028	25,627	16,884	61,263	15,986	5,970
S	10,200	1,654	1,802	10,132	1,899	6,578
A	0,1853	0,4912	-0,0827	0,1679	-0,0776	0,0908
E	-0,6382	0,5058	-0,5862	-0,6514	-1,0073	-1,0521
min	39	21,6	12,50	39	11,79	-6,536
max	87	31,8	21,52	87	19,52	18,833
med	60	25,4	17,06	61	15,84	5,914

В таблице обозначено: N — число объектов в выборке, M — среднее арифметическое значение, S — выборочное стандартное отклонение, A — коэффициент асимметрии выборки, E — коэффициент эксцесса, min — минимальное значение, max — максимальное значение, med — медианное значение.

В результате получим коэффициент детерминации $R^2 = 0,4996$, что неудовлетворительно.

Воспользуемся методами регрессионного анализа для получения более приемлемых результатов приближения [18–20]. На основании (1) запишем:

$$V^{\text{контр}} = \frac{V^{\text{прогр}}}{1 + 0,01\delta} \quad (4)$$

Рассмотрим некоторое скорректированное значение программной оценки объема партии лесоматериалов:

$$V^{\text{прогр,кorr}} = \frac{V^{\text{прогр}}}{1 + 0,01\delta^{\text{кorr}}} \quad (5)$$

причем положим:

$$\delta^{\text{кorr}} = f(V^{\text{прогр}}, d_{\text{ср}}^{\text{прогр}}, n^{\text{прогр}}). \quad (6)$$

Для приближения оценок $V^{\text{прогр,кorr}}$ к контрольным значениям $V^{\text{контр}}$ зададимся условием:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N (\delta_i - \delta_i^{\text{кorr}})^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Таблица 3. Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии (8)

№	Коэффициент	Оценка	S_a	t_a
1	a_0	4,51	91,2	0,0494
2	a_1	4,86	6,22	0,782
3	a_2	-0,2	0,6953	0,2876
4	a_3	0,3757	2,8807	0,1304
5	a_4	0,01383	0,02685	0,5151
6	a_5	-0,0758	0,1827	0,4152
7	a_6	-0,0384	0,0387	0,9934

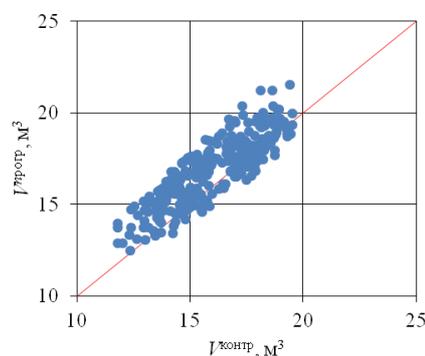


Рис. 1. Сопоставление объема партии, определенного с использованием программы *Timbeter* без корректировки, с контрольным значением (ЛЮ-1)

Примем общий вид функции $\delta^{\text{кorr}}$:

$$\delta^{\text{кorr}} = a_0 + a_1 V^{\text{прогр}} + a_2 n^{\text{прогр}} + a_3 d_{\text{ср}}^{\text{прогр}} + a_4 V^{\text{прогр}} n^{\text{прогр}} + a_5 V^{\text{прогр}} d_{\text{ср}}^{\text{прогр}} + a_6 n^{\text{прогр}} d_{\text{ср}}^{\text{прогр}}, \quad (8)$$

где a_j — коэффициенты регрессионной модели, подлежащие определению с учетом (7).

Результаты расчета представлены в табл. 3.

После исключения статистически незначимых коэффициентов получим оценки коэффициентов уравнения (8), представленные в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии (8)

№	Коэффициент	Оценка	S_a	t_a
2	a_1	2,369	0,3090	7,667
7	a_6	-0,02194	0,003354	-6,541

Тогда уравнение (8) примет следующий вид:

$$\delta^{\text{корр}} = 2,369V^{\text{прогр}} - \text{prog}9\text{et}n^{\text{прогр}}d_{\text{ср}}^{\text{прогр}}. \quad (9)$$

Рассчитаем скорректированный объем партии, определяемый по результатам программного замера по формуле (5) с учетом оценки отклонения:

$$V^{\text{прогр,корр}} = \frac{V^{\text{прогр}}}{1 + 0,01 \cdot (2,369V^{\text{прогр}} - \text{prog}1 \cdot \text{tn}^{\text{прогр}}d_{\text{ср}}^{\text{прогр}})}. \quad (10)$$

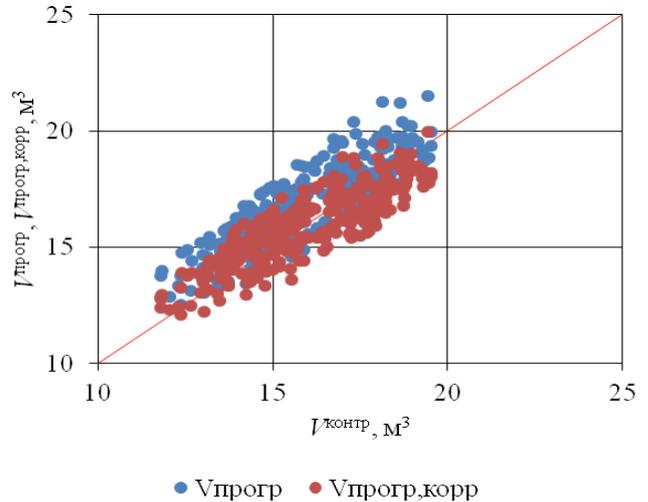
Результаты расчета по уравнению (9) сопоставлены с контрольными значениями на рис. 2.

По графику отметим качественное приближение скорректированных значений объемов партий, рассчитанных на основе результатов замеров $V^{\text{прогр}}$, $d_{\text{ср}}^{\text{прогр}}$, $n^{\text{прогр}}$ с использованием уравнения (9), к контрольным значениям.

Для количественной оценки улучшения приближения данных воспользуемся коэффициентом детерминации R^2 . Коэффициент детерминации для функции:

$$V^{\text{контр}} = V^{\text{прогр,корр}}, \quad (11)$$

рассчитанный по формуле (3) при $V_i^{\text{прогр}} = V_i^{\text{прогр,корр}}$, составляет $R^2 = 0,7635$. Таким образом, доля вариации объема партии лесоматериалов, объясненная с учетом корректировки, повысилась на $\frac{0,7635-0,4996}{0,4996} \cdot 100\% \approx 53\%$.



● $V^{\text{прогр}}$ ● $V^{\text{прогр,корр}}$
Рис. 2. Сопоставление объема партии, определенного с использованием программы *Timbeter* с корректировкой, с контрольным значением (ЛО-1)

Далее изучим результаты использования модели (10) при обработке данных в контрольных выборках.

Выполним проверку сходимости контрольных данных и результатов программной оценки объема лесоматериалов с учетом корректировки (10).

В табл. 5 приведены основные статистические данные по контрольной выборке ЛК-1 (№ 2).

Объем партии, определенный с использованием программы *Timbeter* без корректировки, сопоставлен с контрольными значениями на рис. 3 (выборка ЛК-1).

Таблица 5. Статистические данные по выборке ЛК-1

Показатель	$n^{\text{прогр}}$, шт.	$d_{\text{ср}}^{\text{прогр}}$, см	$V^{\text{прогр}}$, м³	$n^{\text{контр}}$, шт.	$V^{\text{контр}}$, м³	δ , %
N	331	331	331	331	331	331
M	57,396	26,192	16,509	57,347	15,663	5,759
S	9,337	1,861	1,971	9,357	2,025	7,235
A	-0,0785	0,4236	-0,0615	-0,0617	0,2052	-0,0072
E	-0,5179	-0,0024	-0,3065	-0,5091	-0,1208	-0,2216
min	32	21,9	11,05	32	10,78	-12,856
max	80	31,7	21,58	80	21,87	29,605
med	57	26	16,52	57	15,56	5,668

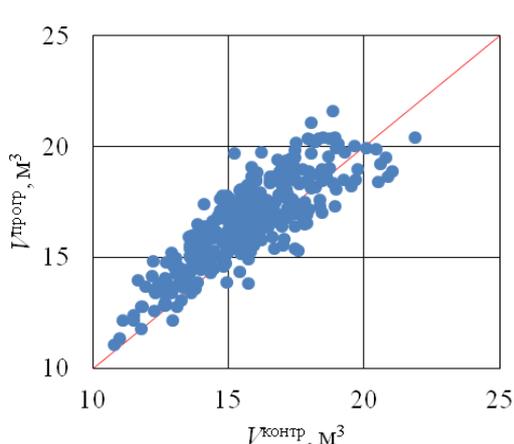


Рис. 3. Сопоставление объема партии, определенного с использованием программы *Timbeter* без корректировки, с контрольным значением (ЛК-1)

По формулам (2), (3) рассчитаем коэффициент детерминации $R^2 = 0,5126$. На рис. 4 сопоставлены результаты расчета скорректированных оценок объемов партий лесоматериалов с контрольными значениями.

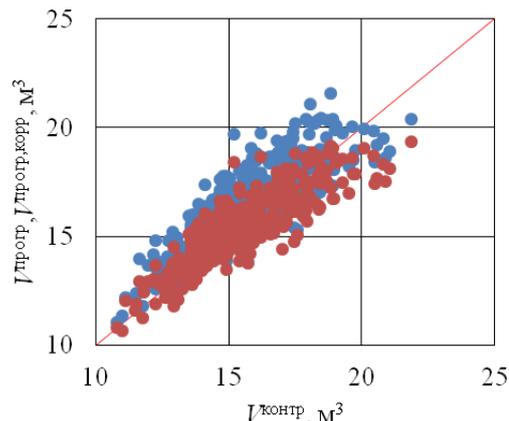


Рис. 4. Сопоставление результатов оценки объемов партий бревен с контрольными значениями с учетом корректировки (ЛК-1)

Как и в основной выборке, использование корректировки по формуле (10) повышает долю объясненной вариации, $R^2 = 0,7454$. Следовательно, увеличение составляет $\frac{0,7454-0,5126}{0,5126} \cdot 100\% \approx 45\%$.

В табл. 6 приведены основные статистические данные по контрольной выборке ЛК-2 (№ 3).

Таблица 6. Статистические данные по выборке ЛК-2

Показатель	$n^{прогр}, шт.$	$d_{ср}^{прогр}, см$	$I^{прогр}, M^3$	$n^{контр}, шт.$	$I^{контр}, M^3$	$\delta, \%$
N	364	364	364	364	364	364
M	60,404	25,806	16,868	60,434	16,015	5,747
S	9,754	1,920	1,926	9,759	2,057	7,462
A	-0,0303	0,3319	0,0956	-0,0311	0,4765	0,2389
E	0,0803	0,0928	1,1195	0,1089	1,1730	0,2224
min	32	20,8	10,35	32	10,55	-16,480
max	88	32,2	24,73	88	25,46	33,383
med	60	25,7	16,90	60	15,93	5,160

Объем партии, определенный с использованием программы *Timbeter* без корректировки, сопоставлен с контрольными значениями на рис. 5 (выборка ЛК-2).

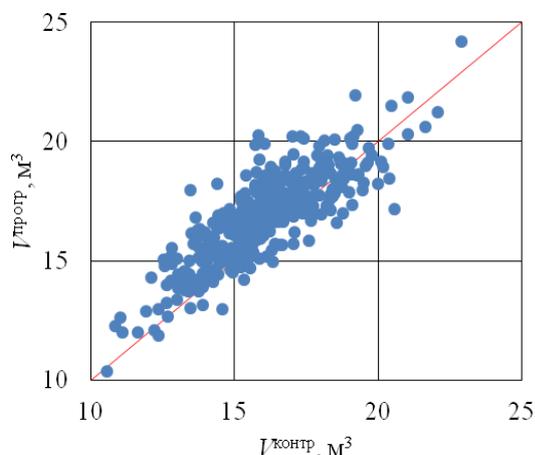


Рис. 5. Сопоставление объема партии, определенного с использованием программы *Timbeter* без корректировки, с контрольным значением (ЛК-2)

По формулам (2), (3) рассчитаем коэффициент детерминации $R^2 = 0,5110$. На рис. 6 сопоставлены результаты расчета скорректированных оценок объемов партий лесоматериалов с контрольными значениями.

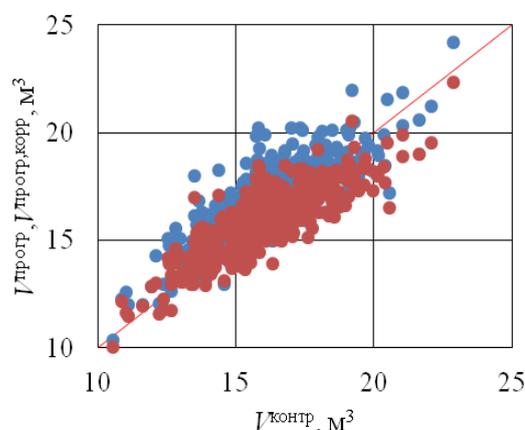


Рис. 6. Сопоставление результатов оценки объемов партий бревен с контрольными значениями с учетом корректировки (ЛК-2)

Как и в основной выборке, использование корректировки по формуле (10) повышает долю объясненной вариации, коэффициент детерминации $R^2 = 0,7156$. Тогда увеличение составляет $\frac{0,7156-0,5110}{0,5110} \cdot 100\% \approx 40\%$.

В табл. 7 приведены основные статистические данные по контрольной выборке ЛК-3 (№ 3).

Объем партии, определенный с использованием программы *Timbeter* без корректировки, сопоставлен с

Таблица 7. Статистические данные по выборке ЛК-3

Показатель	$n^{\text{прогр}}, \text{шт.}$	$d_{\text{ср}}^{\text{прогр}}, \text{см}$	$V^{\text{прогр}}, \text{м}^3$	$n^{\text{контр}}, \text{шт.}$	$V^{\text{контр}}, \text{м}^3$	$\delta, \%$
N	48	48	48	48	48	48
M	58,667	25,813	16,290	58,729	15,310	6,720
S	12,374	2,199	2,170	12,330	2,135	6,826
A	-0,150	0,997	-0,544	-0,158	-0,581	-0,227
E	-0,037	2,261	0,937	-0,002	0,564	-0,763
min	24	21,9	9,27	24	8,51	-7,359
max	82	33,7	20,37	82	19,22	18,472
med	58	25,55	16,39	58	15,85	7,007

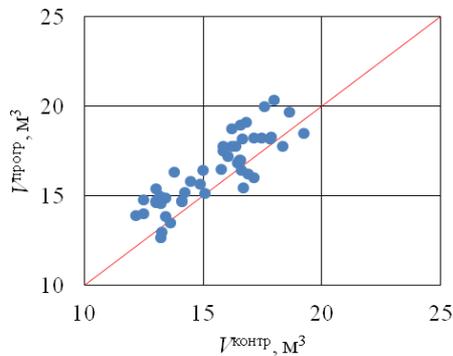


Рис. 7. Сопоставление объема партии, определенного с использованием программы *Timbeter* без корректировки, с контрольным значением (ЛК-3)

Как и ранее, использование корректировки по формуле (10) повышает долю объясненной вариации, $R^2 = 0,7938$. Следовательно, доля объясненной вариации выходной величины повысилась на $\frac{0,7938-0,5661}{0,5661} \cdot 100\% \approx 40\%$.

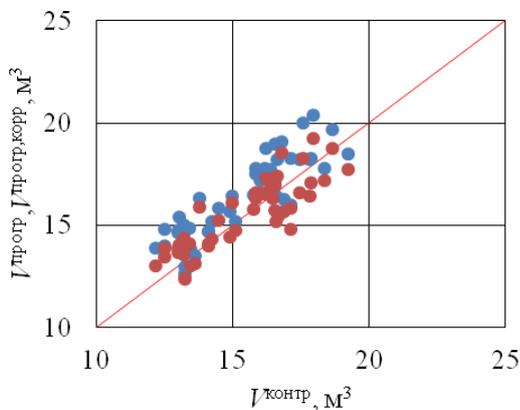


Рис. 8. Сопоставление результатов оценки объемов партий бревен с контрольными значениями с учетом корректировки (ЛК-3)

контрольными значениями на рис. 7 (выборка ЛК-3). По формулам (2), (3) рассчитаем коэффициент детерминации $R^2 = 0,5661$.

На рис. 8 сопоставлены результаты расчета скорректированных оценок объемов партий лесоматериалов с контрольными значениями.

Выводы

Современные алгоритмы обработки данных и технические средства позволяют проводить оценку объема партии лесоматериалов по снимку. Однако, как показал анализ результатов, полученных с использованием программы *Timbeter*, методика программной оценки объема партии требует дальнейшего совершенствования. Установлено, что при программном определении объема лиственных лесоматериалов непосредственные оценки завышены по сравнению с контрольными. Распределение относительных отклонений оценок от контрольных значений не подчиняется нормальному закону распределения. Отмеченное обстоятельство косвенно подтверждает выдвинутое предположение, что завышенные оценки обусловлены влиянием геометрических параметров лесоматериалов, главным образом — сбега и закомлеванности.

В результате анализа выборки партий лиственных лесоматериалов получена регрессионная модель (10), предназначенная для корректировки программной оценки объема партии с учетом объема, среднего диаметра и числа бревен. Использование модели (10) позволяет повысить точность программной оценки по сравнению с контролем, коэффициент детерминации модели $R^2 = 0,7635$. Доля вариации исследуемой величины (объема партии), объясненной с помощью (10), (11), повышается на 53 % по сравнению с нескорректированной моделью (2). Аналогичные результаты получены в контрольных выборках.

Литература

1. Григорьев И.В. Направления совершенствования харвестерных головок // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы VI Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (22 мая 2020 г.). Петрозаводск, 2020. С. 45-47.
2. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Глуховский В.М. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. 2016. № 2 (184). С. 109-116.
3. Рудов С.Е., Григорьев И.В. Пути повышения эффективности работы систем машин для сортиментной заготовки древесины // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы VII Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2021. С. 168-169.
4. Тамби А.А., Григорьев И.В., Давтян А.Б., Помигуев А.В., Калита О.Н., Григорьев В.И. Технологическая интеграция лесопромышленных предприятий // Деревообрабатывающая пром-сть. 2021. № 1. С. 26-37.
5. Швецова В.В. Эффективность геометрического учета заготовленной древесины современными лесозаготовительными машинами // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы VII Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2021. С. 203-204.
6. Швецова В.В. Автоматизация геометрического метода учета круглых лесоматериалов // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы VI Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием. (22 мая 2020 г.). Петрозаводск, 2020. С. 149-150.
7. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Kaznacheeva N., Levushkin D., Druzyanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Akinin D. Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology // Journal of Forest Science. 2021. V. 67. № 5. P. 212-218.
8. Николаев А.И., Стариков А.В., Батуринов К.В. Особенности функционирования автоматизированной системы учета заготовленной древесины и контроля ее происхождения // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 109-117.
9. Стариков А.В., Батуринов К.В. Методика и программно-технические средства автоматизированного учета древесины при ее заготовке и транспортировке // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. № 1 (27). С. 343-345.
10. Атаманова А.С., Чирьшев Ю.В. Способ обнаружения лесоматериалов на цифровых изображениях с помощью методов машинного обучения // Актуальные проблемы развития технических наук: сб. ст. участников XXII Областного конкурса науч.-исслед. работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». Екатеринбург, 2020. С. 55-63.
11. Стариков А.В., Батуринов К.В. Исследование и анализ методов учета заготовленной древесины в России и зарубежных странах // Лесотехнический журнал. 2015. № 4. С. 104-113.
12. Chiryshov Y.V., Kruglov A.V., Atamanova A.S. Automatic detection of round timber in digital images using random decision forests algorithm // ACM International Conference Proceeding Series. Ser. «Proceedings of 2018 International Conference on Control and Computer Vision, ICCCV 2018». P. 39-44.
13. Гуров С.В., Герасин М.Л. Моделирование систем. Сыктывкар: СЛИ, 2002. 160 с.
14. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Вильямс, 2016. 912 с.
15. Liengme B.V. A Guide to Microsoft Excel 2013 for Scientists and Engineers, Chapter 4 - Using Functions, Editor(s): Bernard V. Liengme // Academic Press, 2016. P. 49-74. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802817-9.00004-0>. (дата обращения: 20.12.2021).
16. Liengme B.V. A Guide to Microsoft Excel 2013 for Scientists and Engineers, Chapter 8 - Regression Analysis, Editor(s): Bernard V. Liengme // Academic Press, 2016. P. 157-179. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802817-9.00008-8>. (дата обращения: 20.12.2021).
17. Liengme B.V. A Guide to Microsoft Excel 2013 for Scientists and Engineers, Chapter 16 - Statistics for Experimenters, Editor(s): Bernard V. Liengme // Academic Press, 2016. P. 321-345. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802817-9.00016-7> (дата обращения: 20.12.2021).
18. Григорьева О.И. Статистические характеристики сосновых насаждений, пройденных рубками ухода // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 10. С. 84-87.
19. Григорьева О.И., Григорьев М.Ф. Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований рубок ухода в сосновых насаждениях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. № 10 (36). С. 148-152.
20. Измайлова В.С., Григорьева О.И. Оценка успешности естественного возобновления ели после сплошных рубок в Лисинском лесничестве // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве: материалы молодежной междунар. науч.-практической конф. (29-30 нояб. 2017 г.). СПб., 2017. С. 31-34.

References

1. Grigor'ev I.V. Directions for improving harvester heads // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy VI Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (22 maya 2020 g.). Petrozavodsk, 2020. P. 45-47.
2. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I., Gluhovskij V.M. Perspective directions of development of technological processes of forest-cutting works // Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya prom-st'. 2016. № 2 (184). P. 109-116.
3. Rudov S.E., Grigor'ev I.V. Ways to increase the efficiency of machine systems for assortment timber harvesting // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy VII Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem. Petrozavodsk, 2021. P. 168-169.
4. Tambi A.A., Grigor'ev I.V., Davtyan A.B., Pomiguyev A.V., Kalita O.N., Grigor'ev V.I. Technological integration of timber enterprises // Derevoobrabatyvaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2021. № 1. P. 26-37.
5. SHvecova V.V. Efficiency of geometric accounting of harvested wood by modern logging machines // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy VII Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem. Petrozavodsk, 2021. P. 203-204.
6. SHvecova V.V. Automation of geometrical method of roundwood accounting // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy VI Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem. (22 maya 2020 g.). Petrozavodsk, 2020. P. 149-150.
7. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Kaznacheeva N., Levushkin D., Druzyanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Akinin D. Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology // Journal of Forest Science. 2021. V. 67. № 5. P. 212-218.
8. Nikolaev A.I., Starikov A.V., Baturin K.V. Features of functioning of an automated system for accounting of harvested timber and control of its origin // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 3 (23). P. 109-117.

9. Starikov A.V., Baturin K.V. Methodology and program-technical means of automated accounting of timber during its harvesting and transportation // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. 2017. V. 5. № 1 (27). P. 343-345.
10. Atamanova A.S., Chiryshchev YU.V. Method of timber detection in digital images using machine learning methods // Aktual'nye problemy razvitiya tekhnicheskikh nauk: sb. st. uchastnikov XXII Oblastnogo konkursa nauch.-issled. rabot «Nauchnyj Olimp» po napravleniyu «Tekhnicheskie nauki». Ekaterinburg, 2020. P. 55-63.
11. Starikov A.V., Baturin K.V. Research and analysis of accounting methods of harvested wood in Russia and foreign countries // Forestry Engineering Journal. 2015. № 4. P. 104-113.
12. Chiryshchev Y.V., Kruglov A.V., Atamanova A.S. Automatic detection of round timber in digital images using random decision forests algorithm // ACM International Conference Proceeding Series. Ser. «Proceedings of 2018 International Conference on Control and Computer Vision, ICCCV 2018». P. 39-44.
13. Gurov S.V., Gerasin M.L. Systems Modeling. Syktyvkar: SLL, 2002. 160 p.
14. Drejper N., Smit G. Applied regression analysis. M.: Vil'yams, 2016. 912 p.
15. Liengme B.V. A Guide to Microsoft Excel 2013 for Scientists and Engineers, Chapter 4 - Using Functions, Editor(s): Bernard V. Liengme // Academic Press, 2016. P. 49-74. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802817-9.00004-0>. (data obrashcheniya: 20.12.2021).
16. Liengme B.V. A Guide to Microsoft Excel 2013 for Scientists and Engineers, Chapter 8 - Regression Analysis, Editor(s): Bernard V. Liengme // Academic Press, 2016. P. 157-179. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802817-9.00008-8>. (data obrashcheniya: 20.12.2021).
17. Liengme B.V. A Guide to Microsoft Excel 2013 for Scientists and Engineers, Chapter 16 - Statistics for Experimenters, Editor(s): Bernard V. Liengme // Academic Press, 2016. P. 321-345. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802817-9.00016-7> (data obrashcheniya: 20.12.2021).
18. Grigor'eva O.I. Statistical characteristics of pine plantations passed by thinning // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2005. № 10. P. 84-87.
19. Grigor'eva O.I., Grigor'ev M.F. Statistical processing of the results of experimental studies of thinning in pine plantations // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. 2017. V. 5. № 10 (36). P. 148-152.
20. Izmajlova V.S., Grigor'eva O.I. Evaluation of the success of natural regeneration of spruce after clearcuts in Lisinsk forestry // Aktual'nye voprosy v lesnom hozjajstve: materialy molodezhnoj mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (29-30 noyab. 2017 g.). SPb., 2017. P. 31-34.