

УДК 630.30

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПО СРЕДНИМ ТАКСАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЛЕСОНАСАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

¹Шегельман И.Р., ²Щеголева Л.В., ²Будник П.В., ³Баклагин В.Н.

¹*Карельская региональная общественная организация «Инженерная академия»,
Петрозаводск, e-mail: shegelman@onego.ru;*

²*ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск,
e-mail: schegoleva@petsu.ru, budnikpavel@yandex.ru;*

³*ФГБУН «Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН»,
Петрозаводск, e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

Повышение эффективности работы предприятий лесопромышленного комплекса может быть достигнуто путем увязывания их в единую систему по заготовке, транспортировке, переработке и возобновлению биомассы древесины. Для этого необходимо решить задачу формирования оптимального портфеля заказов, увязывающего лесозаготовителей и потребителей древесины. Поставленная задача не может быть решена без научного прогноза выхода стволовой древесины с территории лесосырьевой базы. Целью исследования является разработка методики прогнозирования выхода стволовой древесины с участка леса в зависимости от его общих таксационных характеристик. Авторами на основании предложенной методики разработан программный комплекс, в основе которого имитационная модель генерирования стволов лесонасаждения с заданными таксационными характеристиками. В настоящей статье приведено описание методики расчета и разработанной имитационной модели. С целью апробации предложенной методики проведено сравнение расчетов, выполненных с использованием разработанного программного комплекса и данных объективного контроля средств харвестеров. Для сравнения использовались показатели количества стволов и средний объем ствола. Анализ показал, что расхождение между средними значениями показателей, полученными с использованием программного комплекса, и данными объективного контроля харвестера по большинству лесосек не превышало 15%.

Ключевые слова: лесозаготовки, технологическая сеть, выход стволовой древесины, имитационное моделирование

FORECASTING OF STEMWOOD OUTPUT DEPENDING ON TAXATIONAL CHARACTERS OF FOREST BASED ON SIMULATION STUDY

¹Shegelman I.R., ²Schegoleva L.V., ²Budnik P.V., ³Baklagin V.N.

¹*Karelian regional public organization «Engineering Academy»,
Petrozavodsk, e-mail: shegelman@onego.ru;*

²*Petrozavodsk State University (PetrSU), Petrozavodsk,
e-mail: schegoleva@petsu.ru, budnikpavel@yandex.ru;*

³*Institute of northern water problems Karelian research center of RAS,
Petrozavodsk, e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

The efficiency improving of forestry enterprises can be achieved by linking them into a single system for harvesting, transportation, processing and restoration of wood biomass. For that the problem of creating the optimal stock of orders connecting timber procurer and consumers of timber must be solved. The problem of creating the optimal stock of orders can not be solved without a scientific stemwood output from the territory of wood material base. The aim of the study is to develop a method for forecasting of stemwood output from cutting area depending on the general taxational characters of forest based. The methods of calculation of stemwood output and software package are developed by authors. The methods of calculation of stemwood output and software package repose on the simulated model which to generate trunks of tree depending on the general taxational characters of forest based. Calculation data were compared with data of harvester recorder. The number of trunks of tree and average volume of the trunks were used for comparison. The analysis showed that the difference between the average figures obtained using the software package and data of harvester recorder for most cutting areas does not exceed 15%.

Keywords: logging, network technology, stemwood output, simulation study

В последнее время задаче увеличения эффективности лесопромышленных производств уделяется повышенное внимание. Об этом свидетельствуют многочисленные опубликованные исследования как отечественных, так и зарубежных специалистов (в частности, [3, 8, 9]). Одним из подходов

к решению такой задачи является увязывание отдельных предприятий по заготовке, транспортировке и переработке биомассы древесины посредством сквозных технологических процессов в производственные комплексы. Такие комплексы получили название технологических сетей [1].

Под термином «технологическая сеть» понимается совокупность предприятий (лесозаготовительные, деревообрабатывающие, целлюлозно-бумажные, лесохимические, питомники и др.), объединенных транспортной инфраструктурой и функционально-технологическими связями.

Для построения экономически эффективных и экологически безопасных технологических сетей авторами статьи разработана и продолжает совершенствоваться методология анализа и синтеза сквозных технологических процессов комплексного освоения биомассы древесины с рециклингом образующихся отходов [6]. Методология основывается на совместном применении эвристических методов инженерного творчества с методами математического моделирования и экономического анализа.

Среди эвристических методов инженерного творчества центральное место отводится функционально-технологическому анализу (ФТА) [5]. Из числа математических методов предлагается использовать методы теории очередей, имитационного моделирования, линейного и динамического программирования. При этом методы математического моделирования применяются для анализа и совершенствования существующих технологических и технических решений, а также для поиска «узких мест» в технологических и производственных процессах, протекающих в лесопромышленном комплексе. В свою очередь ФТА – для синтеза принципиально новых технических и технологических решений, позволяющих устранить имеющиеся «узкие места». Экономический анализ используется для проверки экономической целесообразности разрабатываемых решений в различных природно-производственных условиях.

Одним из ключевых вопросов в построении рациональных технологических сетей являются задачи формирования оптимального портфеля заказов, увязывающего лесопотребителей и лесопользователей. В работе [7] была осуществлена постановка такой задачи. Ее быстрое и эффективное решение не может быть осуществлено без научного прогноза выхода стволовой древесины с территории лесосырьевой базы. Целью данного исследования является разработка методики моделирования выхода стволовой древесины с лесосырьевой базы в зависимости от ее средних таксационных характеристик.

Методы исследования

Описание имитационной модели

Для получения прогноза выхода стволовой древесины с определенной территории лесопользователям необходимо знать

как ряд таксационных характеристик лесонасаждения, так и характеристики отдельных деревьев: высоту дерева, форму ствола и т.п. Эти характеристики для различных деревьев одного насаждения могут значительно отличаться. Получение таких данных является трудоемким и дорогостоящим процессом. Лесопользователи, как правило, располагают лишь общими таксационными характеристиками лесонасаждения, указанными в технологических картах, такими как средний запас леса на гектаре, средний диаметр древостоя на высоте груди, состав насаждения, эксплуатационная площадь.

В строении лесов в зависимости от средних таксационных показателей древостоя есть ряд важных закономерностей. К таким закономерностям относится распределение деревьев по толщине и высоте. На основе таких закономерностей можно спрогнозировать характеристики отдельных деревьев в насаждении. На основании этого авторами предложена методика моделирования выхода стволовой древесины. Для реализации этой методики разработан программный комплекс, позволяющий рассчитать выход стволовой древесины. В основе данного комплекса имитационная модель для моделирования характеристик отдельных стволов лесонасаждения по его общим таксационным характеристикам.

В качестве входных данных для модели служат общие таксационные характеристики лесонасаждения, известные арендаторам леса, такие как: средний запас на гектаре, породный состав, средний диаметр на высоте груди, разряд высот, а также площадь участка леса, для которого будут моделироваться стволы деревьев.

Моделирование каждого отдельного ствола начинается с генерации породы. Генерация породы осуществляется согласно заданному породному составу лесонасаждения. Породный состав лесонасаждения выражается формулой, например 7ЕЗБ. Это означает, что в насаждении 70% деревьев составляет ель и 30% – береза. Таким образом, формула выступает в качестве закона распределения.

После формирования породы определяется диаметр ствола на высоте груди. Для этого используются закономерности рядов распределения деревьев по ступеням толщины для спелых и перестойных древостоев, полученные проф. А.Г. Мошкалевым [2]. Выбор того или иного ряда обуславливается средним диаметром дерева в лесонасаждении и его породой. На основании выбранного ряда распределения случайным образом разыгрывается ступень толщины дерева на высоте груди. Одна ступень толщины

составляет 4 см. В рамках одной ступени толщины с использованием равномерного распределения определяется диаметр на высоте груди моделируемого ствола в сантиметрах.

Для определения высоты моделируемого ствола дерева (или длины, что в данном случае равносильно) с заданным диаметром на высоте груди используются типовые значения высот в зависимости от ступени толщины и разряда высот, полученные проф. А.Г. Мошкалевым для Ленинградской области [4]. Типовые значения высот приведены по ступеням толщины. Для полученного диаметра высота определялась с использованием линейной интерполяции в метрах с градацией до двух знаков после запятой.

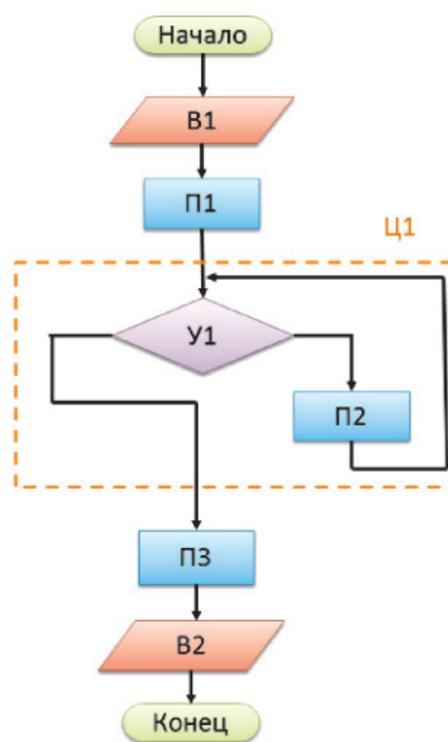
На практике разряд высоты может быть не известен. В этом случае предлагается вести расчет с использованием типовых рядов динамики высот по ступеням толщины в зависимости от среднего диаметра древостоя по А.А. Кулишису [2].

Использование значения диаметра на высоте груди обусловлено тем, что большинство таблиц в таксационных справочниках построены на основе данной величины, которую при проведении таксации лесонасаждений удобнее измерять. Тем не менее, необходимо определить диаметр ствола в комле. Для этого используются таблицы диаметров стволов на высоте пня в зависимости от диаметра на высоте груди и породы, составленные А.М. Межибовским [4]. Так как таблицы составлены по ступеням толщины, при определении значения диаметра комля дерева применялся метод линейной интерполяции. Таким образом, рассчитывается диаметр ствола у комля в сантиметрах.

Для определения формы ствола предложено использовать результаты исследований проф. В.К. Захарова [2], позволяющие выразить объемы отдельных секций стволов длиной $0,1h$ (где h – высота) в процентах от общего объема ствола. В.К. Захаровым была составлена таблица средних форм древесных стволов в разрезе пород в относительных величинах по относительным высотам, содержащая относительный сбег ствола в процентах от диаметра на $0,1h$. По таблице определяются диаметры секций на высотах от 0 до $0,9h$ через каждые $0,1h$. Для каждой секции рассчитывается объем. Сумма объемов отдельных секций составляет объем всего ствола.

Изложенным выше способом расчет проводится по каждому стволу до тех пор, пока суммарный объем всех стволов не достигнет запаса для заданного лесонасаждения.

На рисунке представлена блок-схема алгоритма моделирования стволов лесонасаждения.



Блок-схема алгоритма имитационной модели

Блок «B1» включает операции ввода всех необходимых данных для моделирования стволов лесонасаждения: площадь лесонасаждения (Га) записывается в переменную «square», средний запас лесонасаждения на гектар (m^3/Ga) записывается в переменную «stockOnHe». Заполняется список элементов «typesParameters». Каждый элемент списка включает в себя кортеж из пяти параметров насаждения и соответствует определенной породе древостоя: «type» (порода), «percent» (доля данной породы в лесонасаждении), «method» (методика расчета высоты для данной породы), «hRank» (разряд высот), «diameter» (средний диаметр породы на высоте груди в сантиметрах). Также блок «B1» включает операторы для загрузки в оперативную память данных всех используемых оцифрованных таблиц.

Блок «П1» осуществляет вычисление общего запаса лесонасаждения «stock». Также в блоке «П1» инициализируется переменная «totalVolume», получающая значение, равное 0. Эта переменная будет учитывать суммарный объем моделируемых стволов.

Блок условия «У1» проверяет, не превышает ли суммарный объем сгенерированных на текущем шаге стволов запас лесонасаждения ($totalVolume < stock$). Если условие выполняется, то управление передается в блок «П2».

Блок «П2» представляет собой тело цикла, который выполняется, пока условие, представленное в блоке «У1», не станет ложным. Блок «П2» включает все этапы по моделированию ствола согласно описанной выше методике: генерация породы, генерация диаметра согласно выбранному из таблицы распределению, расчет высоты ствола, согласно выбранному варианту расчета. Вариант расчета высоты выбирается из «словаря» «typeMethod» для заданной породы. После чего рассчитывается диаметр комля «diameters0», на основании которого рассчитываются 10 диаметров на высотах от 0 до 0,9h через каждые 0,1h.

Если условие блока «У1» не выполнено, то управление передается в блок «П3», где рассчитываются статистические характеристики моделируемого лесонасаждения. В блоке «В2» осуществляется вывод информации по каждому сгенерированному стволу в EXCEL-файл. На этом алгоритм заканчивает свою работу.

Таким образом, выходными данными для программы является детальная информация, описывающая геометрическую форму каждого ствола и его объем.

Программный комплекс снабжен аналитической компонентой, позволяющей получить общие данные по выходу ствольной древесины: количество стволов по породам, их общий объем, средние показатели длины, объема, диаметра на высоте груди, распределение стволов в зависимости от диаметра на высоте груди, высоты и количества стволов.

Проверка имитационной модели

Для проверки адекватности предложенной методики и имитационной модели было отобрано 15 лесосек, расположенных как в южных, так и в северных райо-

нах Республики Карелия. Выбор лесосек обосновывался их типичным характером таксационных характеристик для определенного района республики. Для каждой лесосеки собирались данные по их общим таксационным характеристикам, а также информация о заготовленном на них лесе, полученная по данным средств объективного контроля харвестеров.

По каждой лесосеке были проведены расчеты с помощью разработанного программного комплекса, используя в качестве вводных данных их общие таксационные характеристики. Полученные результаты сравнивались с данными средств объективного контроля харвестеров. Для сравнения использовались показатели количества стволов и средний объем ствола. Показатели выбраны ввиду их доступности.

Результаты сравнения для двух лесосек приведены в таблице.

Лесосека № 1 находилась в Беломорском лесничестве, квартал 28 и имела следующие таксационные характеристики: состав насаждения: СЗЕ1Б; эксплуатационная площадь: 8,7 Га; запас на Га: 147 м³; средний объем хлыста: 0,202 м³. Лесосека № 2 располагалась в Прионежском центральном лесничестве, квартал 21 и характеризовалась следующими таксационными показателями: состав насаждения: 7ЕЗБ; эксплуатационная площадь: 3,3 Га; запас на Га: 158 м³. Средний объем хлыста: 0,204 м³.

Анализ показал, что расхождение между средними значениями показателей, полученными с использованием программного комплекса, и данными средств объективного контроля харвестера по большинству лесосек не превышало 15%. По одной из лесосек расхождение превысило эту границу, и по отдельным показателям составляло более 50% (таблица).

Сравнение данных средств объективного контроля харвестера и результатов работы программного комплекса

Номер лесосеки	Порода	Кол-во стволов, шт.			Средний объем ствола, м ³		
		Программный комплекс		Объективный контроль	Программный комплекс		Объективный контроль
		Среднее значение	Расхождение, %		Среднее значение	Расхождение, %	
1	Сосна	3316	39	5461	0,223	10	0,215
	Ель	1661	47	3155	0,188	34	0,143
	Береза	554	37	875	0,113	31	0,165
	Всего	5530	58	9494	0,201	8	0,186
2	Ель	1879	3	1932	0,228	8	0,212
	Береза	808	2	825	0,116	12	0,132
	Всего	2687	3	2757	0,194	3	0,201

Результаты исследований и их обсуждение

Результатами проведенных исследований являются разработанная методика моделирования выхода стволовой древесины и программный комплекс для ее реализации, в основе которого лежит имитационная модель для расчета стволов лесонасаждения с заданными общими таксационными характеристиками. Апробация программного комплекса показала, что по большинству лесосек (на примере Республики Карелия) расхождение составило не более 15%. По мнению авторов, это приемлемая достоверность, так как при отводе лесосеки допускается расхождение по запасу между таксационными данными, являющимися входными для расчета, и реальными до 10%.

Кроме того, необходимо учитывать и особенности выполнения операций харвестером, и сам процесс измерения параметров ствола, на основании которых получены данные средств объективного контроля харвестера. Производителями лесозаготовительной техники при правильной калибровке технологического оборудования для харвестера допускается ошибка при измерении в 1–3%. На практике эта ошибка может возрастать из-за неправильной калибровки, износа технологического оборудования, специфических особенностей при выполнении операций харвестером. Так при проведении валки, обрезки сучьев и раскряжевки оператору харвестера в некоторых случаях приходится перехватывать ствол дерева, а также осуществлять протаскивание дерева в обратном направлении к комло, что может привести к увеличению показателей. Опрос лесопользователей показал, что расхождение между данными средств объективного контроля и данными, полученными непосредственно обмером штабелей, может достигать 12%.

Требуется также пояснить значительные расхождения по одной из лесосек между результатами, полученными с использованием программного комплекса, и данными средств объективного контроля харвестера. Анализ исходного материала показал, что имелись значительные расхождения между запасом, указанным в технологической карте, откуда брались общие таксационные характеристики лесосеки, и данными, зафиксированными средствами объективного контроля харвестера. Расхождение по запасу составило 28%. Повторный расчет при увеличении запаса леса на 1 Га на указанную величину дает расхождение не более 10%.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что прогнозирование выхода стволовой древесины по общим таксационным характеристикам лесонасаждения возможно с приемлемой достоверностью.

Разработанная методика прогнозирования выхода стволовой древесины и программный комплекс для ее реализации позволит решить задачу по формированию оптимального портфеля заказов в технологических сетях лесопромышленных производств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00327 мол_а.

Список литературы

1. Будник П.В., Шегельман И.Р. К вопросу структурирования описания производственных технологических процессов в лесной отрасли // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2869> (дата обращения 22.01.2016).
2. Загребев В.В. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.В. Загребев, В.И. Сухих, А.З. Швиденко, Н.Н. Гусев, А.Г. Мошкалева. – М.: Колос, 1992. – 495 с.
3. Мохирев А.П., Зырянов М.А. Технология лесосечных работ с сортировкой порубочных остатков древесины // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 3 (27). – С. 118–122.
4. Мошкалева А.Г. Лесотаксационный справочник по Северо-Западу СССР / А.Г. Мошкалева, Г.М. Давидов, Л.Н. Яновский, В.С. Моисеев, Д.П. Столяр, Ю.И. Бурневский – Л.: ЛТА, 1984 – 320 с.
5. Шегельман И.Р. Методология синтеза патентоспособных объектов интеллектуальной собственности: монография / И.Р. Шегельман, А.С. Васильев, П.В. Будник. – Петрозаводск: Verso, 2015. – 131 с.
6. Шегельман И.Р. Обоснование технологических и технических решений для перспективных технологических процессов подготовки биомассы дерева к переработке на шепу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1997. – 36 с.
7. Шегельман И.Р., Щеголева Л.В., Будник П.В. Постановка задачи оптимизации портфеля заказов лесозаготовительных предприятий в технологических сетях лесопромышленных производств // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1 (часть 2). – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2844> (дата обращения 22.01.2016).
8. Dems A., Rousseau L.-M., Frayret J.-M. Effects of different cut-to-length harvesting structures on the economic value of a wood procurement planning problem // Annals of Operations Research. – 2015. – № 232. – P. 65–86.
9. Gharis L., Roise J., McCarter J. A compromise programming model for developing the cost of including carbon pools and flux into forest management // Annals of Operations Research. – 2015. – № 235. – P. 115–133.

References

1. Budnik P.V., Shegelman I.R. *Engineering journal of Don*, 2015, No 2, available at: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2869.
2. Zagreev V.V., Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkaleva A.G. *Obshcheyuznyye normativy dlya taksatsii lesov* [All-Union standards for forest inventory]. Moscow, Kolos, 1992. 495 p.
3. Mokhirev A.P., Zyryanov M.A. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2015, Vol. 27, no. 3, pp. 118–122.
4. Moshkaleva A.G., Davidov G.M., Yanovskiy L.N., Moiseev V.S., Stolyarov D.P., Burnevskiy Yu.I. *Lesotaksatsionnyy spravochnik po Severo-Zapadu SSSR* [Forest taxation guide to the northwest of the USSR]. Leningrad, LTA, 1984. 320 p.
5. Shegelman I.R., Vasilev A.S., Budnik P.V. *Metodologiya sinteza patentospobnykh ob'ektov intellektual'noy sobstvennosti* [Methodology of synthesis of patentable intellectual property]. Petrozavodsk, Verso, 2015. 131 p.
6. Shegelman I.R. *Obosnovanie tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh resheniy dlya perspektivnykh tekhnologicheskikh protsessov podgotovki biomassy dereva k pererabotke na shchepu: Avto-ref. dis. ... dokt. tekhn. nauk.* [Substantiation of technological and technical solutions for advanced manufacturing processes of preparation of wood biomass for processing to chips]. St. Petersburg, 1997. 36 p.
7. Shegelman I.R., Shchegoleva L.V., Budnik P.V. *Engineering journal of Don*, 2015, no. 1, available at: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2844.
8. Dems A., Rousseau L.-M., Frayret J.-M. *Annals of Operations Research*, 2015, no. 232, pp. 65–86.
9. Gharis L., Roise J., McCarter J. *Annals of Operations Research*, 2015, no. 235, pp. 115–133.