

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.П. Мохирев¹✉, М.М. Герасимова², К.П. Рукомойников³, Т.В. Сергеева³

¹ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79

²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Лесосибирский филиал, 664325, Россия, Красноярский край, г. Лесосибирск, ул. Победы, д. 29

³ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», 424000, Россия, Республика Марий Эл, Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3

ale-mokhired@yandex.ru

Рассмотрена разработка программного средства для нахождения оптимальной последовательности технологических операций производственного процесса лесозаготовительного предприятия, а также принципы его работы. Разработка выполнена на основе приведенного в научной литературе алгоритма решения задачи нахождения оптимальной технологической последовательности лесозаготовительных операций в целях автоматизации расчетов, которые являются трудоемкими. Приложение создано на языке программирования Delphi в среде разработки Delphi XE2 RAD Studio. Данные, используемые для расчетов, представлены в таблице Excel. Для нахождения потока минимальной стоимости в программе реализованы алгоритмы Басакера — Гоуэна и Форда — Беллмана. Получен результат работы программного средства — оптимальные технологические цепочки доставки древесины с лесосеки до потребителя и соответствующие им затраты, который выводится на экран и может быть сохранен в файл Excel. Предусмотрена возможность получения пользователем справочной информации о работе с программой. С помощью разработанного приложения определена технологическая цепочка выполнения операций по первичной обработке и транспортировке заготовленной древесины с лесосеки до потребителя, характеризующаяся минимальной стоимостью при выполнении всех видов работ. Апробация показала, что программное обеспечение может быть использовано в практической деятельности руководителем лесозаготовительного процесса на предприятиях лесной отрасли. **Ключевые слова:** лесовозная дорога, программное средство, вывозка, технологические операции, лесозаготовка, предприятие

Ссылка для цитирования: Мохирев А.П., Герасимова М.М., Рукомойников К.П., Сергеева Т.В. Программное средство для нахождения оптимальной последовательности технологических операций производственного процесса лесозаготовительного предприятия // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 1. С. 114–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-114-125

Россия занимает первое место в мире по запасам древесного сырья и лидирует в области его добычи. Лесозаготовительная промышленность развивается с использованием новых технологий для автоматизации процессов, повышения качества продукции и в итоге увеличения прибыли. Экономический эффект от развития лесного сектора связан с обоснованным выбором рациональных технологических цепочек процесса лесозаготовки, адаптированных к конкретным природно-производственным условиям. В качестве основного критерия при этом выступает такой критерий, как «результат — затраты», с учетом минимизации возможных затрат, что, несомненно, позитивно отразится на прибыли [1].

К основным затратам в лесозаготовительном производстве относятся прежде всего затраты на транспортировку; они составляют более 50 %

всех затрат. Для организации и управления транспортировкой древесины необходимы комплексный логистический подход, анализ рынка потребителей, лесного фонда, а также транспортной инфраструктуры как на региональном уровне, так и на уровне лесопромышленных предприятий [2].

Территории лесного фонда характеризуются различными и достаточно сложными природно-производственными условиями, влияющими на процессы заготовки и транспортировки древесины. Природно-климатические факторы отражаются на стоимости строительства и содержания лесных дорог, удельной стоимости вывозки заготовленной древесины [3]. Одним из них является сезонность лесозаготовок [4, 5].

На уровень затрат оказывают влияние такие параметры, как место и время заготовки, порядок обработки, маршрут и объемы транспортировки и т. д. В настоящее время известно множество

вариантов организации технологического процесса заготовки и вывозки древесины с применением лесных складов, которые используются в основном для хранения древесины между транспортными сезонами [6]. От наличия транспортно-складских и обрабатывающих операций зависят структура технологической цепочки, система машин и оборудования [7].

Большое значение имеет ограниченная пропускная способность временных лесовозных дорог. В целях их более эффективного использования следует взвешенно подходить к выбору той или иной технологической цепочки лесозаготовительных работ [8–11].

Перед руководителями лесозаготовительных производств стоят задачи определения оптимальных временных периодов для заготовки и вывозки леса, организации и выполнения технологических операций в рациональной последовательности с минимальными затратами, планирования маршрутов и объемов транспортировки продукции и т. д.

В работах [12, 13] приведены материалы, полученные в результате исследований, проведенных по обоснованию сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесины на основе математических моделей. Применение графоаналитических моделей позволяет рассматривать технологическую цепочку лесозаготовительных операций с позиции логики и давать соответствующую оценку разнообразным системам машин и формировать структуру потоков производства в различных лесозаготовительных технологиях [14].

Для решения задач транспортировки древесины с лесосеки разработаны алгоритмы, основанные на методах теории графов [15, 16]. Однако в них не учтены затраты, которые не зависят от объема вывозки древесины (на строительство и восстановление дорог, хранение древесины на промежуточном и нижнем складах и т. п.). В работах [17–19] представлены графоаналитическая, математическая модели и алгоритм решения задачи нахождения оптимальной технологической цепочки операций лесозаготовительного процесса с учетом затрат на транспортировку древесины и постоянных затрат, не зависящих от объема транспортировки. Следует отметить, что расчеты с использованием данного алгоритма требуют больших затрат времени.

Цель работы

Цель работы — разработка программного средства для нахождения оптимальной последовательности технологических операций производственного процесса лесозаготовительного предприятия.

Т а б л и ц а 1

Список обозначений для описания графа
List of symbols for graph description

Название величины	Обозначение	Единица измерения
Производительность оборудования	P	$\text{м}^3/\text{сут}$
Разгрузка древесины	P	$\text{м}^3/\text{сут}$
Стоимость реализуемой продукции	Π	руб./ м^3
Раскряжевка	B	$\text{м}^3/\text{сут}$
Переменные затраты	C	руб./ м^3
Обрезка сучьев	D	$\text{м}^3/\text{сут}$
Хлысты	F	–
Трудозатраты на выполнение операций в периоде θ	$f_{ij}(\theta)$	ч/ м^3
Граф	G_p	–
Сортименты	H	–
Этап транспортировки	h	–
Номер потребителя	I	–
Деревья	K	–
Лесосека	L_N	–
Объект труда	M	–
Номер лесосеки	N	–
Объем продукции, возможный для приобретения потребителем	Q_{AM}	м^3
Погрузка в автолесовозы	R	$\text{м}^3/\text{сут}$
Фиктивный исток	S	–
Фиктивный сток	T	–
Потребитель	U_i	–
Пропускная способность дуги в периоде θ	$u_{ij}(\theta)$	$\text{м}^3/\text{сут}$
Пропускная способность дуги, соединяющей вершины разных периодов	$u_{ij}(\theta + \tau_{ij})$	$\text{м}^3/\text{сут}$
Объем анализируемого предмета труда, перемещаемый с лесосеки в периоде θ	$V_{M\theta N}$	м^3
Транспортировка водным или железнодорожным транспортом	W	–
Вид операции	X	–
Вершины графа	x_i, x_j	–
Постоянные затраты	Z	руб./ м^3
Временной период	θ	сут
Продолжительность операции	τ_{ij}	сут

Материалы и методы исследования

В работе [17] процесс заготовки, обработки, транспортировки древесины с лесосеки до потребителя представлен в виде динамического графа, вершины которого соответствуют операциям производственного процесса (табл. 1).

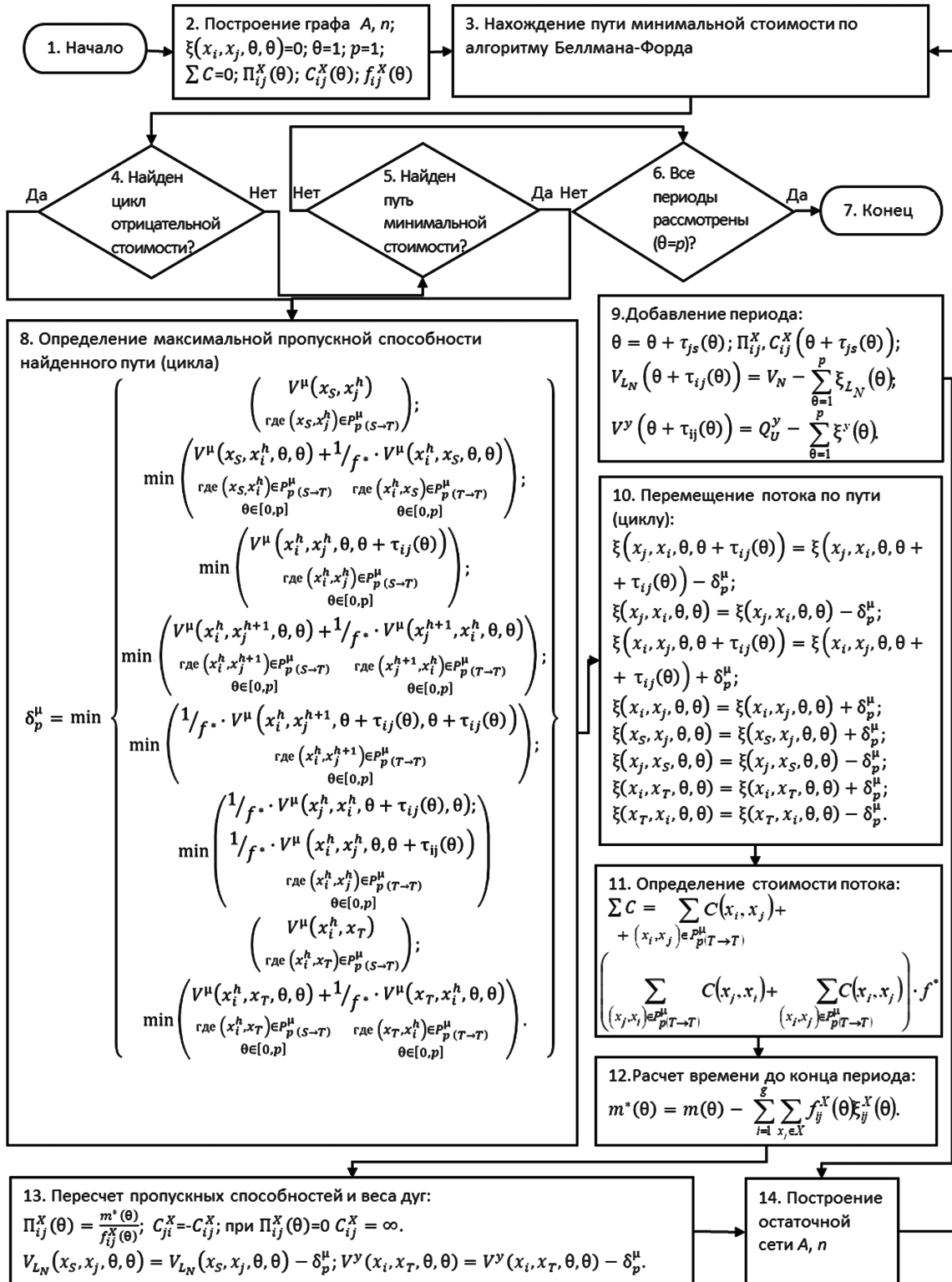


Рис. 1. Алгоритм решения задачи нахождения оптимальной технологической последовательности лесозаготовительных операций

Fig. 1. Algorithm for finding the optimal technological sequence of logging operations

Граф включает в себя несколько копий каждой рассматриваемой вершины в каждом анализируемом периоде. Дуги соединяют пары «вершина — время» как одного, так и разных периодов: (x_i, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij})$. Пропускные способности дуг, сое-

диняющих вершины разных периодов, равны ∞ . Если дуги соединяют вершины одного периода, то их пропускные способности определяются в результате анализа трудозатрат на выполнение различных видов работ технологического процесса.

Технологическая цепочка представлена на графе промежуточными вершинами, расположенными между вершинами, обозначающими лесосеки и потребителей. Из вершин L_N дуги направлены в вершины $Mh\theta N$. Входящие на промежуточный склад дуги соответствуют транспортировке древесины с лесосек. Дуги, входящие в вершину $XM\theta N$, соответствуют погрузке, выходящие из вершины — транспортировке древесины. Они характеризуются пропускной способностью, ограниченной производительностью оборудования, трудозатратами, переменными и постоянными затратами. Постоянные затраты учитываются при хранении древесины между периодами. Дуги, выходящие из фиктивного истока в дуги, характеризующие лесосеки, характеризуются величиной $V_{M\theta N}$. Дугам, входящим в фиктивный сток из вершин потребителей, соответствуют показатели Q_{AM} и Π .

На основе графоаналитической модели разработана математическая модель [18] и алгоритм решения задачи оптимизации технологической последовательности лесозаготовительных операций [19] (рис. 1), условные обозначения в блок-схеме алгоритма приведены в табл. 2.

Величина f^* определяется по формуле

$$f^* = \frac{f_{h,h+1}^*}{f_{h+1,h}^*}.$$

Решение задачи нахождения оптимальной технологической последовательности лесозаготовительных операций сводится к нахождению заданного потока минимальной стоимости в динамической операционной сети [20] в анализируемых на графе временных периодах. Задача решается на основе алгоритма Басакера — Гоуэна [21], в котором путь минимальной стоимости определяется по алгоритму Форда — Беллмана [22].

Расчеты с использованием данного алгоритма являются достаточно трудоемкими, поэтому в целях их автоматизации в среде объектно-ориентированного программирования Delhi XE2 RAD Studio [23] на языке Delphi разработано программное приложение.

На первом этапе разработки [24] сформулированы требования к программному обеспечению. Оно должно предоставлять пользователю следующие возможности: выбор файла данных, представленных в программе Excel, временных периодов для расчета, получение справочной информации, оптимальных технологических цепочек, вычисление прибыли от реализации продукции, вывод полученных результатов на экран и сохранение их в файле Excel.

Модель функционирования программы может быть представлена в виде блок-схемы (рис. 2), а также в виде диаграммы, отображающей связь между блоками программы (рис. 3).

Т а б л и ц а 2

Условные обозначения в описании алгоритма

Conventions in the description of the algorithm

Название величины	Обозначение	Единица измерения
Производительность машин, задействованных при выполнении X -й операции, соответствующей дуге (x_i, x_j) , в периоде θ	$\Pi_{ij}^X(\theta)$	м ³ /сут
Множество дуг графа	A	–
Стоимость пути	C	руб.
Стоимость выполнения X -й операции, соответствующей дуге (x_i, x_j) , в периоде θ	$C_{ij}^X(\theta)$	руб.
Трудозатраты на выполнение X -й операции, соответствующей дуге (x_i, x_j) , в периоде θ	$f_{ij}^X(\theta)$	ч/м ³
Трудозатраты, характеризующие анализируемую насыщенную дугу узкого производственного участка в составе выбранного пути, направленную к фиктивному стоку	$f_{h,h+1}^*$	ч/м ³
Трудозатраты, характеризующие дугу, обратную анализируемой насыщенной дуге узкого производственного участка	$f_{h+1,h}^*$	ч/м ³
Остаточная динамическая сеть	G_p^μ	–
Продолжительность периода θ	$m(\theta)$	сут
Время, оставшееся до завершения периода θ	$m^*(\theta)$	сут
Количество вершин графа	n	шт
Участок пути от фиктивного источника до фиктивного стока	$P_{p(S \rightarrow T)}^\mu$	–
Участок пути от фиктивного стока и обратно	$P_{p(T \rightarrow S)}^\mu$	–
Количество периодов	p	шт
Объем продукции u , возможный для приобретения потребителем U	Q_U^y	м ³
Объем древесины, заготовленной на лесосеке L_N	V_N	м ³
Объем продукции u	V^y	м ³
Объем древесины, доступный для вывозки с лесосеки	V^μ	м ³
Максимальная пропускная способность пути минимальной стоимости в остаточной динамической сети	δ_p^μ	м ³
Величина потока	ξ	м ³
Продолжительность выполнения операции, соответствующей дуге (x_i, x_j) , в периоде θ	$\tau_{ij}(\theta)$	сут



Рис. 2. Блок-схема алгоритма программы
 Fig. 2. Block diagram of the program algorithm

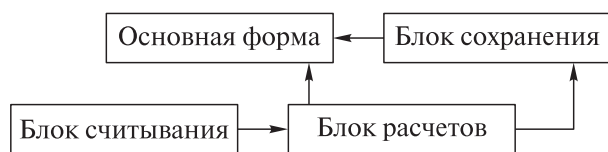


Рис. 3. Блоки программы
 Fig. 3. Program blocks

Каждый из блоков отвечает за определенный функционал работы приложения. Основная форма программы создана для взаимодействия с пользователем и отображения результатов.

Данные, используемые для расчетов, предоставляются в таблице Excel и имеют следующую

структуру (рис. 4). Поскольку каждая операция имеет несколько связанных с ней значений, то в программе создан соответствующий класс — «Операция». Он имеет поля начального и конечного имени (начало и конец дуги графа), пропускную способность, постоянные и переменные затраты, а также сезон и группу. Группа необходима для разделения операций по типу техники, необходимой для их выполнения. Кроме списка операций для расчета нужны и другие значения (объем древесины, имеющийся на лесных участках и др.).

Интерфейс программы содержит поле вывода результатов (таблицу), функциональную кнопку и пункты меню — «Справка» и «Справочник».

		A	B	C	D	E	F	G
1		Производительность по периодам						5
2	Операция	124	31	72	62	71		
3		Зимний (1)	Зимне-весенний (2)	Весенний (3)	Летний (4)	Осенний (5)		6
4a	Погрузка деревьев, м³/сут	550	550	350	400	350		
5	Погрузка хлыстов, м³/сут	600	600	400	450	400		
6								
7		Затраты по периодам						2
8	Операция	Зимний (1)	Зимне-весенний (2)	Весенний (3)	Летний (4)	Осенний (5)		
4b	Погрузка деревьев, руб./м³	150	150	-	150	150		
11	Погрузка хлыстов, руб./м³	130	130	-	130	130		
12								
13								
14								
7	Постоянные затраты Z, руб./м³	16500000						
16	Объем древесной продукции, требуемой потребителю U ₁ , м³	70000						
17	Объем древесины, заготовленной на лесосеке L ₁ , V ₁ , м³	20000						
18	Объем древесины, заготовленной на лесосеке L ₂ , V ₂ , м³	50000						
19								
8	Количество лесовозов, шт.	10						
21	Количество рабочих часов, ч/сут	18						
22	Выручка за 1 м³ для потребителя U ₁ , руб.	3600						
23								
24		Расстояния транспортировки, км						3
25		L ₁	L ₂	Промежуточный склад	Нижний склад	Потребитель U ₁		
26	L ₁	-	-	25	-	-		
27	L ₂	-	-	30	95	-		
28	Промежуточный склад	-	-	-	110	250		
29	Нижний склад	-	-	-	-	489		
30	Нижний склад	-	-	-	-	180		

Рис. 4. Структура файла данных (фрагмент таблицы): блоки: 1 — производительность; 2 — затраты; 3 — расстояние транспортировки; 4a, 4б — наименование операции в блоках производительности и затрат (должны совпадать); 5 — продолжительность периодов; 6 — наименование периодов, в скобках указаны их номера; 7 — постоянные затраты, объемы древесины на лесосеках и требуемые потребителю; 8 — количество машин, ч/сут, выручка за 1 м³

Fig. 4. The structure of the data file (fragment of the table): blocks: 1 — performance; 2 — costs; 3 — transportation distance; 4a, 4b — the name of the operation in the blocks of productivity and costs (must coincide); 5 — duration of periods; 6 — names of periods, their numbers are indicated in brackets; 7 — fixed costs, the volume of wood in the cutting area and required by the consumer; 8 — number of cars, h/day, revenue per 1 m³

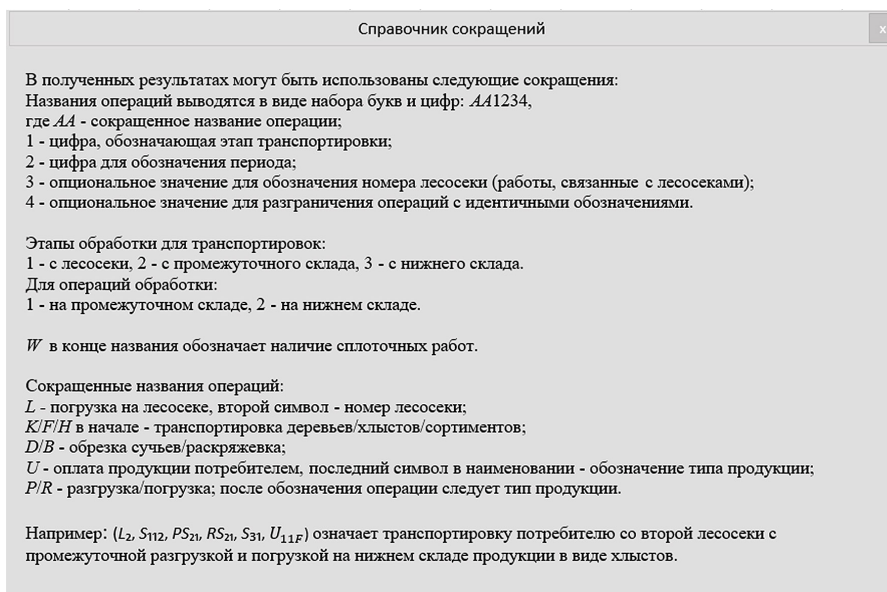


Рис. 5. Справочник используемых сокращений
 Fig. 5. Directory of abbreviations used

Первый выводит информацию о правилах работы с приложением и о файле данных. «Справочник» отображает окно с информацией о сокращениях, используемых в результатах расчетов (тип операций, период, этап и т. д.) (рис. 5).

В блоке считывания (см. рис. 3) происходит получение данных из файла согласно выбранным пользователем периодам и преобразование их к требуемому виду, необходимому для работы программы. Создаются и заполняются таблицы,

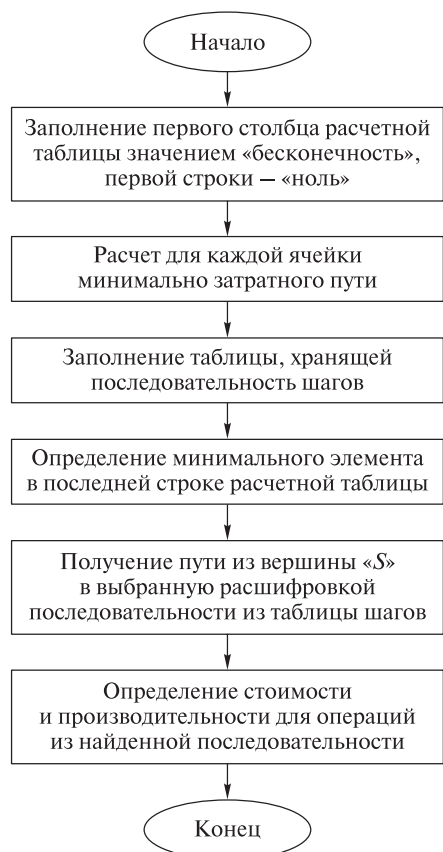


Рис. 6. Блок-схема алгоритма построения оптимального пути
Fig. 6. Block diagram of the algorithm for constructing the optimal way



Рис. 7. Блок-схема алгоритма пересчета данных
Fig. 7. Block diagram of the data recalculation algorithm

содержащие постоянные и переменные затраты на транспортировку древесины и ее хранение между периодами, пропускные способности дорог, а также рассчитанная на их основе производительность [25].

После получения данных выполняется переход к блоку расчета, состоящему из двух частей: подблоков построения пути (рис. 6) и пересчета данных (рис. 7).

Оптимальный путь, которому соответствуют минимальные затраты, вычисляется по алгоритму Форда — Беллмана, остаточная сеть строится на основании алгоритма Басакера — Гоуэна. При пересчете данных (трудозатрат на выполнение операции, производительности машин и оборудования) происходит учет времени периода на выполнение одноименных операций на разных технологических участках. После пересчета данных выполняется проверка времени, оставшегося в данном периоде на выполнение очередной последовательности операций. Если период закончился, и не весь объем заготовленной древесины вывезен, то добавляются данные следующего периода. Расчеты заканчиваются, когда вся древесина вывезена с лесосек.

Результаты расчетов выводятся на экран в табличном виде, после чего функциональная кнопка приложения меняет надпись с «Начать расчет» на «Сохранить результат». При нажатии открывается диалоговое окно, в котором необходимо выбрать директорию и ввести имя файла, которое автоматически генерируется в виде «Результат_дд.мм.гг-чч.мм.сс» (в имени отображается дата и время создания файла во избежание дублирования, которое может привести к ошибке), но может быть изменено пользователем.

Результаты и обсуждение

С использованием разработанного приложения решена задача определения технологической цепочки выполнения операций по первичной обработке и транспортировке заготовленной древесины с двух лесных участков Хребтовского лесозаготовительного участка (ЛЗУ) ЗАО «Новоенисейский ЛХК» до потребителя, характеризующейся минимальной стоимостью при выполнении всех видов работ с учетом исходных данных [26]. В Красноярском крае в связи с природно-климатическими условиями транспортировку лесоматериалов с лесосеки до потребителя в большинстве случаев осуществляют в зимний и летний периоды. Поэтому для упрощения решения задачи рассмотрены только эти периоды с учетом временных параметров остальных периодов.

В результате работы программы получены оптимальные последовательности технологических операций и их характеристики (рис. 8).

На основании полученных расчетов определены:

- рациональные маршруты вывозки древесины с лесных участков;
- рациональный объем лесоматериалов, который можно вывезти на нижний береговой склад

	Значение:
ПУТЬ:	$S, L_2, H_{112}, U_{21Н}, T$
ОБЪЕМ, м ³ :	31400
ПЕРЕМЕННЫЕ ЗАТРАТЫ, руб./м ³ :	- 1958
ПОСТОЯННЫЕ ЗАТРАТЫ, руб./м ³ :	0
ИТОГО, руб.:	- 61481200
ПУТЬ:	$S, L_2, H_{142}, P_{H42}, R_{H4W}, H_{342}, U_{24Н}, T$
ОБЪЕМ, м ³ :	18600
ПЕРЕМЕННЫЕ ЗАТРАТЫ, руб./м ³ :	- 2236
ПОСТОЯННЫЕ ЗАТРАТЫ, руб./м ³ :	16500000
ИТОГО, руб.:	- 25089600
ПУТЬ:	$S, L_1, H_{111}, U_{11Н}, T$
ОБЪЕМ, м ³ :	20000
ПЕРЕМЕННЫЕ ЗАТРАТЫ, руб./м ³ :	- 1957,8
ПОСТОЯННЫЕ ЗАТРАТЫ, руб./м ³ :	0
ИТОГО, руб.:	- 39150000
ВСЕГО	
СУММАРНЫЙ ОБЪЕМ, м ³	70000
СУММАРНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ЗАТРАТЫ, руб.	16500000
ИТОГОВЫЕ ЗАТРАТЫ, руб.	- 125720800

Рис. 8. Технологические цепочки, полученные в результате работы программы
Fig. 8. Technological chains obtained as a result of the program

для дальнейшей транспортировки водным транспортом;

– рациональные объемы транспортировки древесины автомобильным транспортом в каждом из рассматриваемых периодов.

Рациональный вариант вывозки древесины (см. рис. 8) предусматривает, что древесина, заготовленная на лесосеке L_1 в объеме 20 000 м³ и на лесосеке L_2 в объеме 34 100 м³, будет вывозиться потребителю автомобильным транспортом в зимнем периоде. Остальная часть объема древесины лесосеки L_2 (18 600 м³), будет транспортироваться автотранспортом до нижнего склада и далее водным путем в летнем периоде.

Для оценки эффективности полученной технологической цепочки осуществлен анализ альтернативных и наиболее часто применяемых на территории Красноярского края при похожих условиях вариантов технологических цепочек транспортно-переместительных работ. Рассмотрим некоторые из них.

Вариант 1. Транспортировка в хлыстах в летний период до нижнего склада с дальнейшим сплавом максимально возможного объема древесины, остальной объем в период заготовки (зимний) автотранспортом до потребителя. В данном случае с лесосеки L_2 в летний период транспортируется на нижний склад с дальнейшим водным транспортом потребителю объем древесины, равный 18 600 м³. Остальная часть

объема древесины с этой лесосеки (31 400 м³) в зимний период вывозится автотранспортом до потребителя. Весь объем (20 000 м³) с лесосеки L_1 транспортируется в зимний период.

Вариант 2. Транспортировка автомобильным транспортом максимально возможного объема сортиментов в зимний период до потребителя, остального объема – автотранспортом в летний период до потребителя. В данном случае транспортировка всего объема (50 000 м³) с лесосеки L_2 будет доставляться потребителю в зимний период, часть объема (3770 м³) с лесосеки L_1 транспортируется также в зимний период, остальная часть объема (16 230 м³) этой лесосеки — в летний период.

Вариант 3. Транспортировка автомобильным транспортом максимально возможного объема сортиментов в зимний период до потребителя, остального объема в летний период до нижнего склада с дальнейшим сплавом. В данном случае транспортировка всего объема (50 000 м³) с лесосеки L_2 будет доставляться потребителю в зимний период, часть объема (3770 м³) с лесосеки L_1 транспортируется также в зимний период, остальная часть объема (16 230 м³) с этого лесного участка — сплавом в летний период.

Затраты на выполнение операций по каждому варианту, прибыль от реализации продукции и краткая сравнительная характеристика технологических цепочек представлены в табл. 3.

Сравнительная характеристика вариантов технологических цепочек при равном объеме транспортировки (70 000 м³) и доходе от реализации продукции (252 000 тыс. руб.)

Comparative characteristics of the options for technological chains with an equal volume of transportation (70,000 m³) and income from product sales (252,000 thousand rubles)

Характеристика	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Рациональный вариант
Технологическая цепочка (по вершинам первоначального графа)	$S, L_1, F_{111}, U_{11F}, T;$ $S, L_2, F_{112}, U_{11F}, T;$ $S, L_2, F_{142}, P_{F42},$ $R_{F4W}, F_{342}, U_{14F}, T$	$S, L_2, H_{112}, U_{11H}, T;$ $S, L_1, H_{111}, U_{11H}, T;$ $S, L_1, H_{141}, U_{14H}, T$	$S, L_2, H_{112}, U_{11H}, T;$ $S, L_1, H_{111}, U_{11H}, T;$ $S, L_1, H_{141}, P_{H41},$ $R_{H4W}, H_{342}, U_{14H}, T$	$S, L_1, H_{111}, U_{11H}, T$ $S, L_2, H_{112}, U_{11H}, T$ $S, L_2, H_{142}, P_{H42},$ $R_{H4W}, H_{342}, U_{14H}, T$
Продукция	Хлысты	Сортименты	Сортименты	Сортименты
Затраты, руб.	151 036 300	137 252 225	130 825 145	126 279 200
Прибыль, руб.	100 963 700	114 747 775	121 174 855	125 720 800
Экономический эффект, руб./м ³	353,67	156,76	64,94	–

Экономический эффект при применении рационального варианта по сравнению с вариантом 1, полученный делением разницы в прибыли на объем реализованной продукции, составит 353,67 руб./м³.

Аналогично рассчитан экономический эффект при сравнении рационального варианта организации технологического процесса с вариантами 2 и 3.

Таким образом, при применении оптимальной технологической цепочки появляется возможность сокращения суммарных затрат на выполнение плана работ по транспортно-переместительным операциям до 16 % по сравнению с другими альтернативными вариантами технологических цепочек. Экономический эффект при этом может составлять до 353,67 руб./м³.

Выводы

Разработанное программное обеспечение позволяет находить оптимальные последовательности технологических операций производственного процесса лесозаготовительного предприятия, которые позволяют минимизировать затраты на транспортные и погрузочно-разгрузочные работы и, как следствие, увеличить прибыль от реализации продукции. Программа позволяет сократить время и трудозатраты, необходимые для решения технологической задачи, и может быть использована на лесозаготовительном предприятии для оптимизации процесса организации лесозаготовительного производства.

Список литературы

- [1] Вашкевич Е. Лесозаготовка в контексте науки // Лесной комплекс Сибири, 2016. №1 (17). URL: <https://ru.calameo.com/read/003770176bbeaa1eb8935> (дата обращения 15.03.2021).
- [2] Яшин А.В. Оптимизация транспортно-технологического процесса лесозаготовительного предприятия: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01: защищена 02.03.2010. Санкт-Петербург, 2010. 204 с.
- [3] Мохирев А.П., Позднякова М.О., Гудень Т.С., Сухинин В.Д. Влияние природно-производственных факторов на транспортные затраты лесозаготовительного производства // Лесотехнический журнал, 2019. № 2. С. 107–117.
- [4] Шегельман И.Р., Лукашевич В.М. Оценка сезонности при подготовке лесозаготовительного производства // Фундаментальные исследования, 2011. № 12. С. 599–603.
- [5] Суханов В.С. О сезонном характере лесозаготовок // Архитектурно-строительная мастерская «Древнерусский дом». URL: <https://kelohouse.ru/vse-o-dereviannom-srube/o-sezonnom-kharaktere-lesozagotovok.html> (дата обращения 21.03.2021).
- [6] Mokhired A., Gerasimova M., Rukomojnikov K. Improvement of logging operations technological chains in the conditions of seasonal dynamics // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2020, v. 574, p. 012053. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012053.
- [7] Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Ученые записки ПетрГУ. Сер. Естественные и технические науки, 2010. № 4(109). С. 66–75.
- [8] Борисов Г.А., Кукин В.Д., Кузина В.И. Методы поиска наиболее выгоднейшего варианта сети лесовозных дорог // ИВУЗ Лесной журнал, 2001. № 3. С. 64–70.
- [9] Бурмистрова О.Н., Сушков С.И., Пильник Ю.Н. Оптимизация параметров транспортных процессов на предприятиях лесопромышленного комплекса // Фундаментальные исследования, 2015. № 11–2. С. 237–241.
- [10] Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and methodology for planning the wood fiber flow in the forest supply chain // Recent developments in supply chain management Eds. R. Koster, W. Delfmann. Helsinki: University Press, 2008, pp. 11–39.
- [11] Pentek T., Nevečerel H., Ecimović T., Lepoglavec K., Papa I., Tomašić Z. Strategijsko planiranje šumskih prometnica u Republici Hrvatskoj – raščlamba postojećega stanja kao podloga za buduće aktivnosti // Nova Mehanizacija Šumarstva, 2014, no. 35 (1), p. 63.
- [12] Шегельман И.Р. Анализ сквозных процессов заготовки биомассы дерева и ее переработки на щепу // Современные проблемы развития лесопромышленных производств, 2001. № 6. С. 13–23.
- [13] Шегельман И.Р., Щеголева Л.В., Пономарев А.Ю. Математическая модель выбора сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесного сырья // Изв. СПбЛТА, 2005. № 172. С. 32–37.

- [14] Сазонова Е.А. Исследование и обоснование технологических процессов лесосечных работ на основе сквозного энергетического анализа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Екатеринбург, 2005. 19 с.
- [15] Mokhiev A., Rukomoynikov K. Graphic-analytical modelling of technological chain of logging operations in dynamic natural and production conditions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, v. 316, p. 012039. DOI:10.1088/1755-1315/316/1/012039
- [16] Боженюк А.В., Герасименко Е.М. Разработка алгоритма нахождения максимального потока минимальной стоимости в нечеткой динамической транспортной сети // Инженерный вестник Дона, 2013. № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1583> (дата обращения 10.02.2021).
- [17] Рукомойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // ИВУЗ Лесной журнал, 2019. № 4 (370). С. 94–107. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94
- [18] Mokhiev A., Rukomoynikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Finding an effective technological chain of logging operations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, v. 817, p. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012024
- [19] Mokhiev A., Rukomoynikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Development of methodological foundations for the design of logging infrastructure taking into account the dynamically changing environment // J. of Applied Engineering Science, 2020, v. 18, br. 4, p. 500–504.
- [20] Потоки в сетях. URL: http://www.math.nsc.ru/LBRT/k4/or/or_part6.pdf (дата обращения 30.03.2021).
- [21] Задача о потоке минимальной стоимости. Алгоритм Басакера — Гоуэна нахождения оптимального потока. URL: <https://studfile.net/preview/1725896/page:4/> (дата обращения 30.03.2021).
- [22] Алгоритм Беллмана — Форда. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Беллмана_—_Форда (дата обращения 15.03.2021).
- [23] Культин Н.Б. Основы программирования в Embarcadero Delphi, 2015. 232 с. URL: https://www.studmed.ru/kultin-n-b-osnovy-programirovaniya-v-embarcaderodelphi_9fcfc1db9e2.html (дата обращения 15.03.2021).
- [24] Модели и методологии разработки. URL: <https://geekbrains.ru/posts/methodologies> (дата обращения 15.03.2021).
- [25] Позднякова М.О., Мохирев А.П., Герасимова М.М. Эффективность лесной инфраструктуры в разрезе затрат на транспортировку сырья // Экономика и современный менеджмент: теория, методология, практика: сб. статей IX Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. С. 107–113.
- [26] Герасимова М.М., Медведев С.О., Мохирев А.П., Рукомойников К.П. Оптимизация материальных потоков лесозаготовительного предприятия на основе теории графов // Логистика и управление цепями поставок, 2019. № 6. С. 50–58.

Сведения об авторах

Мохирев Александр Петрович✉ — д-р. техн. наук, проф. кафедры автомобильных дорог и городских сооружений, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ale-mokhiev@yandex.ru

Герасимова Марина Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры информационных и технических систем, Лесосибирский филиал, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», marina-gerasimov@list.ru

Рукомойников Константин Павлович — д-р техн. наук, проф. кафедры лесопромышленных и химических технологий, Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», rukomojnikovkp@volgategatech.net

Сергеева Татьяна Владиславовна — студент, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», sergeeva2010t@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2021.

Одобрено после рецензирования 01.07.2021.

Принята к публикации 05.10.2021.

SOFTWARE TOOL TO FIND OPTIMAL SEQUENCE OF PRODUCTION PROCESS TECHNOLOGICAL OPERATIONS FOR LOGGING ENTERPRISE

A.P. Mokhirev¹✉, M.M. Gerasimova², K.P. Rukomojnikov³, T. V. Sergeeva³

¹Siberian Federal University, 79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia

²Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 29, Pobeda st., 662543, Lesosibirsk, Krasnoyarsk reg., Russia

³Volga State University of Technology, 3, Lenin sq., 424000, Yoshkar-Ola, Republic Of Mari El, Russia

ale-mokhirev@yandex.ru

The development of a software tool for finding the optimal sequence of technological operations of the production process of a logging enterprise, as well as the principles of its operation, is considered. Planning of logging production is quite a complex process, since it is necessary to determine the optimal strategy of activity, taking into account a large number of factors, increasing revenue and reducing costs. There are many options for organizing the technological process of harvesting and hauling wood. The program is developed on the basis of the algorithm given in the scientific literature for solving the problem of finding the optimal technological sequence of logging operations in order to automate calculations that are time-consuming. The application is created in the Delphi programming language in the Delphi XE2 RAD Studio development environment. The data used for the calculations is presented in an Excel table. To find the minimum cost flow, the program implements the Basaker — Gowan and Ford — Bellman algorithms. The result of the software tool is the optimal technological chain of delivery of wood from the cutting area to the consumer and corresponding costs. The results are displayed on the screen and can be saved to an Excel file. It is possible for the user to get help information about working with the program. With the help of the developed application, the technological chain of operations for the primary processing and transportation of harvested wood from the cutting area to the consumer is determined, which is characterized by a minimum cost for performing all types of work. The testing showed that the software can be used in practical activities by the head of the logging process at the enterprises of the forest industry.

Keywords: logging road, software tool, removal, technological operations, logging, enterprise


Suggested citation: Mokhirev A.P., Gerasimova M.M., Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V. *Programmnoe sredstvo dlya nakhozhdeniya optimal'noy posledovatel'nosti tekhnologicheskikh operatsiy proizvodstvennogo protsessa lesozagotovitel'nogo predpriyatiya* [Software tool to find optimal sequence of production process technological operations for logging enterprise]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 114–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-114-125

References

- [1] Vashkevich E. *Lesozagotovka v kontekste nauki* [Logging in the context of science]. *Lesnoy kompleks Sibiri* [Forest complex of Siberia], 2016, no. 1 (17), Available at: <https://ru.calameo.com/read/003770176bbea1eb8935> (accessed 15.03.2021).
- [2] Yashin A.V. *Optimizatsiya transportno-tekhnologicheskogo protsessa lesozagotovitel'nogo predpriyatiya* [Optimization of the transport and technological process of a logging enterprise]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Saint-Petersburg, 2010, 204 p.
- [3] Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Guden' T.S., Suhinin V.D. *Vliyaniye prirodno-proizvodstvennykh faktorov na transportnye zatraty lesozagotovitel'nogo proizvodstva* [Influence of natural production factors on transport costs of logging production]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry engineering journal], 2019, no. 2, pp. 107–117.
- [4] Shegel'man I.R., Lukashevich V.M. *Ocenka sezonnosti pri podgotovke lesozagotovitel'nogo proizvodstva* [Assessment of seasonality in the preparation of logging production]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research], 2011, no. 12, pp. 599–603.
- [5] Suhanov V.S. *O sezonnom karaktere lesozagotovok* [About the seasonal nature of logging]. Available at: <https://kelohouse.ru/vse-o-dereviannom-srube/o-sezonnom-kharaktere-lesozagotovok.html> (accessed 21.03.2021).
- [6] Mokhirev A., Gerasimova M., Rukomojnikov K. Improvement of logging operations technological chains in the conditions of seasonal dynamics. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, v. 574, p. 012053. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012053.
- [7] Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Kuznecov A.V. *Analiz pokazateley raboty i ocenka effektivnosti lesozagotovitel'nykh mashin v razlichnykh prirodno-proizvodstvennykh usloviyakh* [Analysis of performance indicators and evaluation of the efficiency of logging machines in various natural and industrial conditions]. *Uchenye zapiski PetrGU. Ser.: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Scientific notes of PetrSU: natural and technical sciences series], 2010, no. 4(109), pp. 66–75.
- [8] Borisov G. A., Kukin V.D., Kuzina V.I. *Metody poiska naivyygodneyshego varianta seti lesovoznykh dorog* [Methods of searching for the most advantageous variant of the logging road network]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2001, no. 3, pp. 64–70.
- [9] Burmistrova O.N., Sushkov S.I., Pil'nik YU.N. *Optimizatsiya parametrov transportnykh protsessov na predpriyatiyakh lesopromyshlennogo kompleksa* [Optimization of parameters of transport processes at enterprises of the timber industry complex]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research], 2015, no. 11–2, pp. 237–241.
- [10] Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and methodology for planning the wood fiber flow in the forest supply chain. Recent developments in supply chain management. Eds. R. Koster, W. Delfmann. Helsinki: University Press, 2008, pp. 11–39.
- [11] Pentek T., Nevečeral H., Ecmović T., Lepoglavec K., Papa I., Tomašić Z. Strategijsko planiranje šumskih prometnica u Republici Hrvatskoj — raččlamba postojećega stanja kao podloga za buduće aktivnosti. *Nova Mehanizacija Šumarstva*, 2014, no. 35 (1), p. 63.

- [12] Shegel'man I.R. *Analiz skvoznykh processov zagotovki biomassy dereva i ee pererabotki na shchepu* [Analysis of end-to-end processes of harvesting wood biomass and its processing into wood chips]. *Sovremennye problemy razvitiya lesopromyshlennykh proizvodstv: nauch. tr.* [Modern problems of the development of timber production: scientific works]. Petrozavodsk, 2001, no. 6, pp. 13–23.
- [13] Shegel'man I.R., Shchegoleva L.V., Ponomarev A.Yu. *Matematicheskaya model' vybora skvoznykh potokov zagotovki, transportirovki i pererabotki drevesnogo syr'ya* [Mathematical model of selection of through flows of procurement, transportation and processing of wood raw materials]. *Izvestiya SpbLTA*, 2005, no. 172, pp. 32–37.
- [14] Sazonova E.A. *Issledovanie i obosnovanie tekhnologicheskikh processov lesosechnykh работ na osnove skvoznogo energeticheskogo analiza* [Research and justification of technological processes of logging operations based on end-to-end energy analysis]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. Yekaterinburg, 2005, 19 p.
- [15] Mokhirev A., Rukomoynikov K. Graphic-analytical modelling of technological chain of logging operations in dynamic natural and production conditions. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, v. 316, p. 012039. DOI:10.1088/1755-1315/316/1/012039
- [16] Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E. M. *Razrabotka algoritma nahozhdeniya maksimal'nogo potoka minimal'noy stoimosti v nechetkoy dinamicheskoy transportnoy seti* [Development of an algorithm for finding the maximum flow of the minimum cost in a fuzzy dynamic transport network]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2013, no. 1.
- [17] Rukomoynikov K.P., Mokhirev A.P. *Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy lesozagotovitel'nykh работ putem sozdaniya dinamicheskoy modeli funktsionirovaniya predpriyatiy* [Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2019, v. 4(370), pp. 94–107. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94
- [18] Mokhirev A., Rukomoynikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Finding an effective technological chain of logging operations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, v. 817, p. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012024
- [19] Mokhirev A., Rukomoynikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Development of methodological foundations for the design of logging infrastructure taking into account the dynamically changing environment. *J. of Applied Engineering Science*, 2020, v. 18, br. 4, p. 500–504.
- [20] *Potoki v setyah* [Threads in networks]. Available at: http://www.math.nsc.ru/LBRT/k4/or/or_part6.pdf (accessed 30.03.2021).
- [21] *Zadacha o potoke minimal'noy stoimosti. Algoritm Basakera — Gouena nahozhdeniya optimal'nogo potoka* [The minimum cost flow problem. Basaker — Gowan algorithm for finding the optimal flow]. Available at: <https://studfile.net/preview/1725896/page:4/> (accessed 15.03.2021).
- [22] *Algoritm Bellmana — Forda* [Bellman — Ford algorithm]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Algoritm_Bellmana — Forda](https://ru.wikipedia.org/wiki/Algoritm_Bellmana_-_Forda) (accessed 15.03.2021).
- [23] Kul'tin N.B. *Osnovy programmirovaniya v Embarcadero Delphi* [Fundamentals of programming in Embarcadero Delphi], 2015, 232 p. (accessed 15.03.2021).
- [24] *Modeli i metodologii razrabotki* [Development models and methodologies]. Available at: <https://geekbrains.ru/posts/methodologies> (accessed 15.03.2021).
- [25] Pozdnyakova M.O., Mokhirev A.P., Gerasimova M.M. *Effektivnost' lesnoy infrastruktury v razreze zatrat na transportirovku syr'ya* [Efficiency of forest infrastructure in the context of raw material transportation costs]. *Sbornik statey IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Ekonomika i sovremennyy menedzhment: teoriya, metodologiya, praktika»* [Collection of articles of the IX International Scientific and Practical Conference «Economics and Modern Management: theory, methodology, practice»]. Penza, 2020, pp. 107–113.
- [26] Gerasimova, M.M., Medvedev S.O., Mokhirev A.P., Rukomoynikov K.P. *Optimizatsiya material'nykh potokov lesozagotovlennogo predpriyatiya na osnove teorii grafov* [Optimization of material flows of a logging enterprise on the basis of graph theory]. *Logistika i upravlenie cepyami postavok* [Logistics and supply chain management], 2019, no. 6, pp. 50–58.

Authors' information

Mokhirev Aleksandr Petrovich  — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Highways and Urban Structures of the Siberian Federal University, ale-mokhirev@yandex.ru

Gerasimova Marina Mikhaylovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Information and technical systems of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, marina-gerasimov@list.ru

Rukomoynikov Konstantin Pavlovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Forestry and chemical technologies of the Institute of forest and nature management, Volga State University of Technology, rukomojnikovkp@volgatech.net.

Sergeeva Tat'yana Vladislavovna — Student of the Volga State University of Technology, sergeeva2010t@mail.ru

Received 30.04.2021.

Approved after review 01.07.2021.

Accepted for publication 05.10.2021.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest