

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 630*37, 519.876

DOI: 10.18324/2077-5415-2024-1-109-121

Прогнозирование вывозки древесины лесным комплексом России

П.Ф. Войтко^a, П.М. Мазуркин^b, И.Г. Гайсин^c, Е.М. Царев^d, И.В. Петухов^e, П.Н. Анисимов^f

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, 3, Йошкар-Ола, Республика Марий Эл
^a VojtkoPF@volgatech.net, ^b MazurkinPM@volgatech.net, ^c GaisinIG@volgatech.net, ^d carevEM@volgatech.net,
^e PetuhovIV@volgatech.net, ^f AnisimovPN@volgatech.net

^a <https://orcid.org/0000-0001-6568-2178>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0177-5521>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>, ^e <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>

Статья поступила 18.12.2023, принята 26.01.2024

В связи с резким сокращением объемов перевозок лесоматериалов водным транспортом возникла проблема изменения структуры крупных лесопромышленных предприятий, имеющих рейды приплава. Противоречие определяется практикой краткосрочного планирования, а для крупных структурных сдвигов в транспорте лесного комплекса страны необходима новая методика прогноза объемов вывозки древесины. Целью исследования является моделирование динамики вывозки древесины с 1965 по 2021 гг. по статистическим данным асимметричными вейвлетами и затем прогнозирование по выявленным закономерностям вывозки древесины лесным комплексом России на перспективу до 2077 г. Объектом исследования служили справочные материалы о вывозке древесины автомобильным, железнодорожным и водным транспортом лесным комплексом России за 56 лет, с 1965 по 2021 гг., по российским статистическим ежегодникам и справочным материалам Минлесбумпрома СССР. Предметом исследования было уточнение математических моделей в виде сумм волновых уравнений: 1) вывозки всего объема древесины лесовозным транспортом; 2) поставок древесины железнодорожным транспортом; 3) поставок автомобильным транспортом непосредственно потребителям; 4) поставок водным транспортом. Основанием прогноза для идентификации закономерностей принят период 1965–2021 гг., что позволило дать ориентировочные прогнозы до 2077 г. в программной среде CurvelExpert 1.40. Выполнено математическое моделирование прогноза поставок круглых лесоматериалов потребителям автомобильным, железнодорожным и водным транспортом на ближайшую перспективу до 2077 г. в программной среде CurvelExpert 1.40, проведена экспериментальная проверка прогноза. За период с 1965 по 2021 гг. вывозка древесины лесовозным транспортом в России сократилась на 32,7 %, с 219,9 до 148,0 млн м³, достигнув максимума — 304 млн м³ в 1990 г. Сопоставление трех видов лесотранспорта показывает резкий спад объемов перевозки древесины водным транспортом, стабилизацию перевозок железнодорожным и рост перевозок автомобильным транспортом древесины во двор потребителя на небольшие расстояния. Составленные математико-статистические модели и таблица с фактическими данными вывозки древесины позволяют прогнозировать развитие лесотранспортной структуры лесного комплекса России на ближайшую перспективу до 2077 г.

Ключевые слова: статистические данные; лесовозный транспорт; моделирование; прогноз; динамика; закономерности.

Forecasting wood removal performed by the Russian forestry complex

P.F. Voitko^a, P.M. Mazurkin^b, I.G. Gaisin^c, E.M. Tsarev^d, I.V. Petukhov^e, P.N. Anisimov^f

Volga State University of Technology; 3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El

^a VojtkoPF@volgatech.net, ^b MazurkinPM@volgatech.net, ^c GaisinIG@volgatech.net, ^d carevEM@volgatech.net,

^e PetuhovIV@volgatech.net, ^f AnisimovPN@volgatech.net

^a <https://orcid.org/0000-0001-6568-2178>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0177-5521>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>, ^e <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>

Received 18.12.2023, accepted 26.01.2024

Due to the sharp reduction in the volume of timber transportation by water transport, there is a problem of changing the structure of large timber enterprises that have raids of floating. The contradiction is determined by the practice of short-term planning, and for major structural shifts in the transport of the country's forest complex, a new method of forecasting the volume of timber transportation is needed. The purpose of the study is to model the dynamics of wood removal from 1965 to 2021 according to statistical data by asymmetric wavelets and then forecasting according to the revealed patterns of timber transportation by the Russian forest complex for the future up to 2077. The subject of the study is reference materials on the export of wood by road, rail and water transport by the forest complex of Russia for 56 years from 1965 to 2021 according to Russian statistical yearbooks and reference materials of the Ministry of Forestry of the USSR. Further refinement of mathematical models in the form of sums of wave equations is performed: 1) transportation of the entire volume of wood by logging transport; 2) deliveries of wood by rail; 3) deliveries by road directly to consumers; 4) deliveries by water transport. The basis of the forecast for identifying patterns is adopted in the period 1965-2021, which made it possible to give approximate forecasts up to 2077 in the CurvelExpert 1.40 software environment. Mathematical modeling of the forecast of round

timber supplies to consumers by road, rail and water transport for the near future until 2077 in the CurvelExpert 1.40 software environment is performed, experimental verification of the forecast is carried out. During the period from 1965 to 2021, timber transportation haulage in Russia decreased by 32.7% from 219.9 to 148.0 million m³, reaching a maximum of 304 million m³ in 1990. A comparison of the three types of forest transport shows a sharp decline in the volume of wood transportation by water transport, stabilization of rail transportation and an increase in road transportation of wood to the consumer's yard over short distances. The compiled mathematical and statistical models and a table with the actual data of wood transportation make it possible to predict the development of the forest transport structure of the Russian forest complex in the near future until 2077.

Keywords: statistical data; logging transport; modeling; forecast; dynamics; patterns.

Введение. Общий запас древесины в Российской Федерации составляет 82,4 млрд м³ [1]. Из общего запаса в спелом и переспелом возрастах находится 44,5 млрд м³. Около 76 % общего запаса древесины занимают ценные хвойные породы. Годовой средний прирост древесины в лесах России, по данным 2021 г., составляет 704 млн м³. Расчетная лесосека России в 2016 г. разработана всего на 31 % от общей ее площади, а в развитых странах Европы этот показатель достигает 60–80 % [2]. Доля лесного комплекса в ВВП России составила в 2016 г. всего 1,4 %, в объеме отгруженной продукции — 5 %, в численности работающих в промышленности — 0,7 %, экспорте — 4,6 % [3; 4].

Слабое развитие лесной отрасли России связано с недоступностью в необходимом количестве лесных ресурсов из-за отсутствия дорог общего пользования в труднодоступных лесозаготовительных регионах России [5; 6]. В связи с этим увеличивается расстояние вывозки лесных грузов по лесовозным дорогам, следовательно, растут затраты на заготовку древесины. Чтобы изменить данное положение, в лесной отрасли густота дорожной сети лесного фонда должна составлять не менее 10 м на 1 га. Плотность дорожной сети в России для большинства регионов не соответствует этому показателю и составляет всего 1,46 м/га. Для сравнения, в США этот показатель равен 10, Швеции — 11, Австрии — 36, Финляндии — 40, Германии — 45 м/га [7]. Основные проблемы при строительстве лесных дорог возникают у малых и средних лесозаготовительных предприятий, численность которых преобладает в лесной отрасли. Финансовое состояние таких предприятий не позволяет проводить высокотратные работы по строительству дорог, так как сроки окупаемости магистральных лесовозных дорог длительны и составляют 8–12 лет [8–10].

Неравномерность распределения лесных ресурсов на территории России и отдаленность потребителей лесоматериалов от основных лесозаготовительных районов страны приводит к росту дальности транспортировки лесных грузов. Для транспортировки лесных грузов потребителям применяются автомобильный, железнодорожный, водный транспорт (таблица). В связи с резким сокращением объемов перевозок лесоматериалов водным транспортом возникла проблема изменения структуры крупных лесопромышленных предприятий, имеющих рейды приплава [4; 11]. Противоречие определяется практикой краткосрочного планирования, и для крупных структурных сдвигов в транспорте лесного комплекса страны необходима новая методика прогноза объемов вывозки древесины [5; 8; 12; 13].

Первая попытка прогнозирования лесотранспортной структуры лесного комплекса Российской Федерации была предпринята в 2004 г. [13]. Для составления прогноза использовали методику статистического модели-

рования [15–18], которая включала три стадии: 1) сбор исходных данных объемов перевозки лесных грузов различными видами транспорта; 2) подбор типа устойчивых математических моделей для прогноза лесотранспортной структуры (ограничения задавались самими исходными данными); 3) поиск на персональном компьютере значения параметров математических моделей в виде устойчивых закономерностей. Для ориентировочных прогнозов были взяты диапазон основания прогноза с 1965 по 1999 гг., равный 35 лет, и горизонт прогноза с 2000 по 2035 гг., который равен основанию прогноза.

Второе уточнение прогноза и его проверка были предприняты в 2014 г. [19]. Для этого был выбран диапазон основания прогноза с 1965 по 2012 гг., равный 47 годам, а горизонт прогноза был принят с 2013 по 2040 гг., т. е. из-за мировых экономических кризисов — на длину 27 лет. Приведены уточненные модели по данным развития лесного комплекса за период с 2000 по 2012 гг.

Полученные динамические модели [14; 19] для прогноза развития лесотранспортной структуры были подвергнуты экспериментальной проверке фактическими данными в 2013–2021 гг.

Целью исследования является математическое моделирование динамики вывозки древесины по статистическим данным с 1965 по 2021 гг. асимметричными вейвлетами и прогнозирование по выявленным закономерностям поставки древесины потребителям лесного комплекса России на перспективу до 2077 г.

Основными задачами были разработка математических моделей в виде сумм волновых уравнений: 1) вывозки всего объема древесины лесовозным транспортом; 2) поставки древесины потребителям железнодорожным транспортом; 3) поставки древесины потребителям автомобильным транспортом; 4) поставки древесины водным транспортом.

Методы и методология исследований. Выполнено дальнейшее уточнение математических моделей [20] в виде сумм волновых уравнений с 1965 по 2021 гг.: 1) вывозки всего объема древесины лесовозным транспортом; 2) поставок объемов и доли древесины железнодорожным транспортом; 3) поставок автомобильным транспортом непосредственно потребителям; 4) поставок водным транспортом. Основанием прогноза для идентификации закономерностей принят период 1965–2021 гг., что позволило дать ориентировочные прогнозы до 2077 г.

Сбор исходных данных объемов перевозки круглых лесоматериалов лесовозным транспортом (таблица) был выполнен по российским статистическим ежегодникам 2014–2021 гг. (разделы «лесное хозяйство», «транспорт») и справочным материалам Минлесбумпрома СССР [21; 22].

Таблица. Динамика вывозки древесины в России лесовозным транспортом, млн м³

Годы	Время t , лет	Всего, Q	в том числе:					
			к железной дороге		к пунктам сплава		к пунктам потребления	
			Q ₁	α_1 , %	Q ₂	α_2 , %	Q ₃	α_3 , %
1965	0	219.9	59.3	27.0	108.1	49.1	52.5	23.9
1970	5	224.5	69.4	30.9	99.8	44.5	55.3	24.6
1975	10	233.8	76.4	32.7	91.0	38.9	66.4	28.4
1980	15	205.7	62.6	30.5	72.9	35.4	70.2	34.1
1985	20	208.6	64.0	30.7	64.4	30.9	80.2	38.4
1990	25	304.0	93.9	30.9	49.3	16.2	160.8	52.9
1995	30	116.0	36.1	31.1	11.02	9.5	68.9	59.4
1996	31	96.8	43.6	45.0	7.9	8.2	45.3	46.8
1997	32	85.4	41.8	49.0	7.6	8.9	36.0	42.1
1998	33	78.2	40.6	51.0	7.0	8.9	30.6	39.1
1999	34	86.1	54.3	63.1	8.2	9.5	23.6	27.4
2000	35	94.8	59.9	63.2	8.5	9.0	26.4	27.8
2001	36	96.3	60.9	63.2	8.5	8.8	26.9	27.9
2002	37	97.0	65.0	67.0	7.9	8.1	24.1	24.9
2003	38	105.0	67.9	64.7	7.8	7.4	29.3	27.9
2004	39	112.0	74.5	66.5	9.6	8.6	27.9	24.9
2005	40	113.0	80.6	72.0	8.9	7.9	23.5	20.7
2006	41	118.0	80.7	68.4	7.5	6.4	29.7	25.2
2007	42	134.0	83.4	62.2	13.1	9.8	37.5	28.0
2008	43	108.0	69.2	64.1	10.6	9.8	28.2	26.1
2009	44	100.7	50.7	50.3	6.9	6.9	43.1	42.8
2010	45	112.2	51.9	46.3	7.6	6.7	52.7	47.0
2011	46	120.5	50.7	42.0	7.9	6.6	61.9	51.4
2012	47	121.8	45.2	37.1	10.8	8.9	69.7	57.2
2013	48	119.8	44.6	37.2	11.0	9.2	64.2	53.6
2014	49	123.4	48.4	39.2	8.9	7.2	66.1	53.6
2015	50	126.7	49.4	39.0	8.9	7.0	68.4	54.0
2016	51	136.7	52.7	38.6	8.1	6.0	75.9	55.4
2017	52	139.8	54.1	38.7	7.7	5.5	78.0	55.8
2018	53	149.0	57.1	38.3	7.7	5.2	84.2	56.5
2019	54	143.0	52.5	36.7	7.7	5.4	82.8	57.9
2020	55	143.0	50.9	35.6	7.9	5.5	84.2	58.9
2021	56	148.0	52.2	35.3	7.4	5.0	88.4	59.7

Недостатком табличной модели являются данные через 5 лет за период 1965–1995 гг. По ежегодным данным были бы выявлены более достоверные волновые закономерности перевозки лесных грузов автомобильным, железнодорожным и водным транспортом.

В методе идентификации по данным основания прогноза общая математическая модель задана в виде асимметричного волнового колебания [20; 23]. Поэтому моделирование заключается в структурно-параметрической идентификации по статистическим данным (таблица) в программной среде *CurveExpert 1.40* [23]. Преимуществом математического моделирования является возможность прогнозирования структуры лесовозного транспорта при условии, что в лесном

комплексе не будет изменяться научно-техническая политика.

В природе все процессы происходят по волновым уравнениям колебательной адаптации по общему количеству поведения [23–25] в виде асимметричного вейвлет-сигнала:

$$\begin{aligned}
 y &= \sum_{i=1}^m y_i, \\
 y_i &= A_i \cos(\pi x/p_i - a_{8i}), \\
 A_i &= a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}), \\
 p_i &= a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}},
 \end{aligned} \quad (1)$$

где y — показатель (зависимый фактор); i — номер составляющей модели (1); m — количество членов в модели (1); x — объясняющая переменная (влияющий фактор); $a_1...a_8$ — параметры модели (1), принимаю-

щие числовые значения в ходе структурно-параметрической идентификации в программной среде *CurveExpert 1.40* (www.curveexpert.net) по статистическим данным из таблицы A_i — амплитуда (половина) вейвлета (ось y); p_i — полупериод колебания (ось x).

Формула (1) содержит две фундаментальные физические постоянные: e (число Непера, или число времени) и π (число Архимеда, или число пространства). Тогда по вейвлету (1) внутри изучаемого процесса образуется череда квантованных вейвлет сигналов. Методом идентификации последовательно появляются кванты поведения. Понятие вейвлетного сигнала позволяет абстрагироваться от физического смысла многих статистических рядов измерений и рассматривать их аддитивное разложение на составляющие в виде суммы отдельных вейвлетов (квантов поведения) системы (лесного транспорта в Российской Федерации).

Результаты и обсуждение. Идентификацией общей модели вейвлет-сигнала (1) по статистическим данным динамики вывозки древесины лесовозным транспортом из таблицы были выявлены динамические модели, содержащие несколько составляющих (до 4–6 шт.). На рис. 1–7 приведены графики всех составляющих. Для сохранения высокой точности параметры моделей из

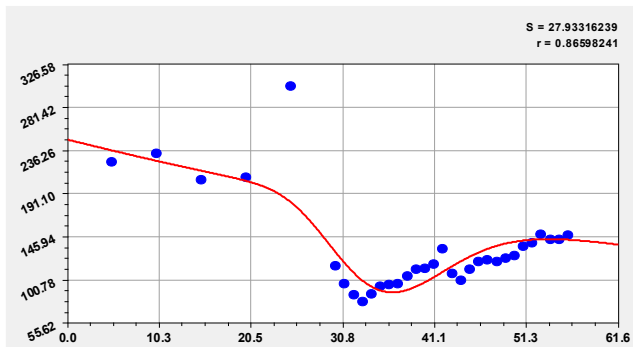
уравнения (1) приведены коэффициенты со всеми 11-значными цифрами, полученными из программной среды *CurveExpert 1.40*.

По вычислительным возможностям программной среды [23] была получена трехчленная модель динамики вывозки древесины лесовозным транспортом (рис. 1, б):

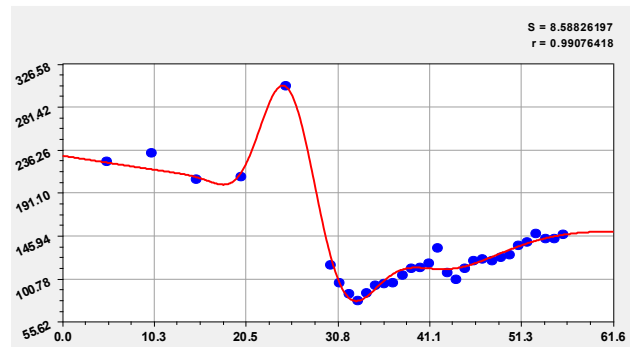
$$y = a \cdot \exp(-b \cdot x) - c \cdot x^d \cdot \exp(-e \cdot x^f) + g \cdot x^h \cdot \exp(-i \cdot x^j) \cdot \cos(\pi \cdot x / k - l), \quad (2)$$

где коэффициенты:

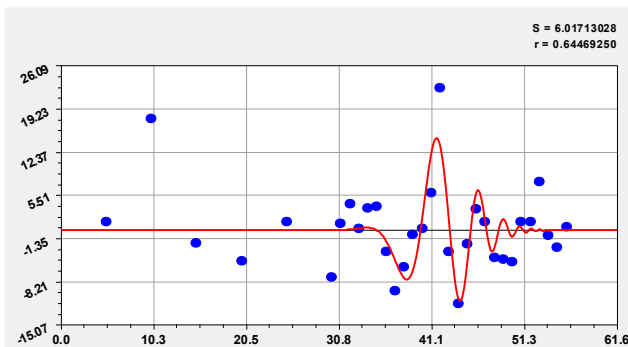
$a = 2.30353780239E+002$;
 $b = 6.43613564083E-003$;
 $c = 6.48256178498E+004$;
 $d = 1.13937171419E+002$;
 $e = 1.59956162857E+002$;
 $f = 2.66240438792E-001$;
 $g = 3.62611437590E-032$;
 $h = 5.10312285519E+001$;
 $i = 1.42941733347E+001$;
 $j = 5.61459420353E-001$;
 $k = 9.53405511707E+000$;
 $l = 1.58315564621E+000$.



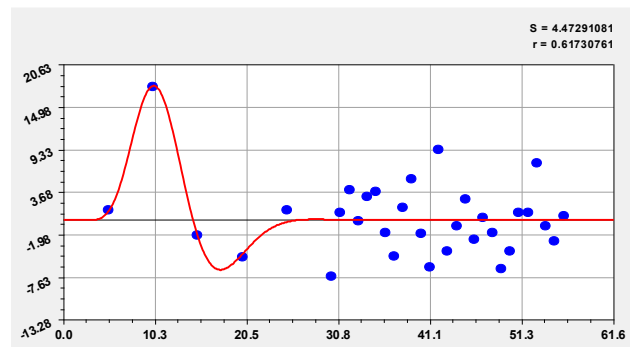
а) двухчленный тренд



б) тренд с одним колебанием



в) четвертая волновая составляющая



г) пятая волновая составляющая

Рис. 1. Графики выявленной модели динамики объемов вывозки древесины, *всего*

Дополнительно были получены две составляющие модели: четвертая (рис. 1, в):

$$y = -a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x^d) \cdot \cos(\pi \cdot x / (e - f \cdot x^g) + h), \quad (3)$$

где коэффициенты:

$a = 1.47319669143E-137$;
 $b = 1.04771849714E+002$;

$c = 3.49482069500E-001$;
 $d = 1.43229194564E+000$;
 $e = 3.51637892432E+001$;
 $f = 5.48209176118E-001$;
 $g = 1.01904787154E+000$;
 $h = 9.78126610449E+000$
 и пятая (рис. 1, г):

$$y = -a*x^b*exp(-c*x)*cos(pi*x/d+e), \quad (4)$$

где коэффициенты:

- a = 1.16394102085E-004;
- b = 8.34981909293E+000;
- c = 7.22214219349E-001;
- d = 1.15739396889E+001;
- e = 7.79301021391E-001.

Полученные математические модели (2), (3), (4) оцениваются по стандартному (среднеквадратичному) отклонению S, а их уровень адекватности оценивается по значению коэффициента корреляции r:

- 1) S = 27,9; r = 0,886 (рис. 1, а);
- 2) S = 8,59; r = 0,991 (рис. 1, б);
- 3) S = 6,02; r = 0,645 (рис. 1, в);
- 4) S = 4,47; r = 0,617 (рис. 1, г).

Тогда, по вычислительным возможностям программной среды, для трехчленной модели (2) получим высокий коэффициент корреляции равным 0,991

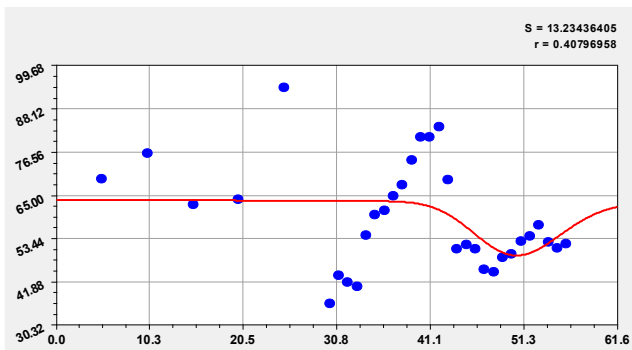
(рис. 1, б), остальные две составляющие имеют более низкие коэффициенты корреляции.

По статистическим данным (таблица) получена математико-статистическая модель вывозки круглых лесоматериалов к железным дорогам:

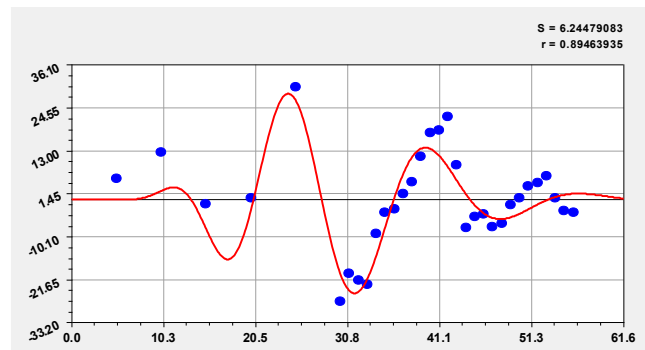
$$y = a*exp(-b*x) - c*x^{114.23810}*exp(-d*x) + e*x^{7.35111}*exp(-f*x)*cos(pi*x/(g+h*x^{0.12178})-i), \quad (5)$$

где коэффициенты:

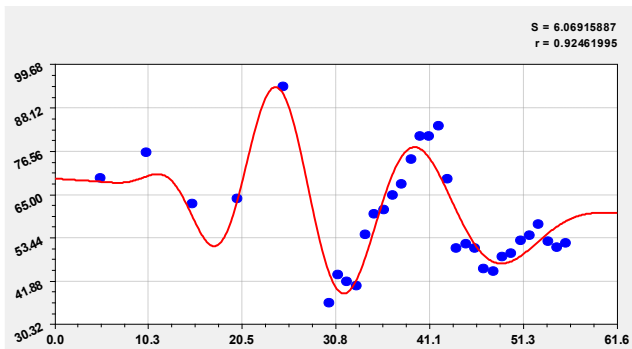
- a = 6.92238928670E+001;
- b = 2.22562704398E-003;
- c = 3.35710880832E-144;
- d = 2.28426346468E+000;
- e = 1.47628132131E-006;
- f = 2.75200894289E-001;
- g = 8.36703725837E+000;
- h = 9.21214337958E+000;
- i = 1.94016554818E+000.



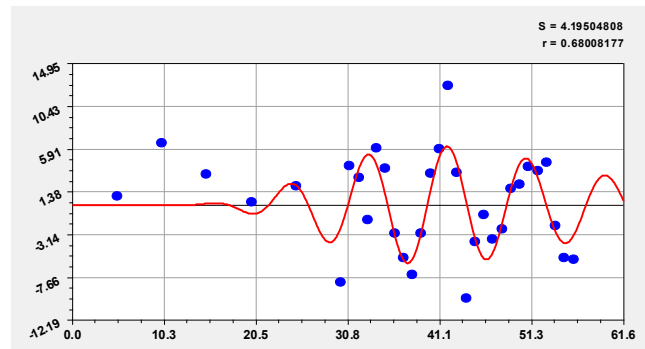
1. Двухчленный тренд



2. Колебательное возмущение



3. Тренд с одним колебанием



4. Пятая волновая составляющая

Рис. 2. Графики модели динамики объемов вывозки древесины к железным дорогам

Достоверность полученной математической модели (5) подтверждается вычисленными минимальными среднеквадратичными отклонениями и высокими коэффициентами корреляции:

- 1) S = 13,23; r = 0,408 (рис. 2, а);
- 2) S = 6,24; r = 0,895 (рис. 2, б);
- 3) S = 6,07; r = 0,925 (рис. 2, в);
- 4) S = 4,19; r = 0,680 (рис. 2, г).

Следовательно, для математико-статистической модели (5) коэффициент корреляции составил 0,895, а графическое выражение ее представлено на рис. 2, б.

По исходным данным (таблица) получены математико-статистические модели динамики вывозки круглых лесоматериалов к пунктам сплава (рис. 3, б):

$$y = a*exp(-b*x^c) - d*x^e*exp(-f*x^g) - h*x^i*exp(-j*x)*cos(pi*x/(k+l*x)-m), \quad (6)$$

где коэффициенты:

- a = 1.07504032939E+002;
- b = 4.81314360265E-003;
- c = 1.58003723186E+000;
- d = 3.11942156236E+005;

$e = 1.43292797049E+002;$
 $f = 1.92489094899E+002;$
 $g = 2.78938701134E-001.$

$$y = a * x^b * \exp(-c * x^d) * \cos(\pi * x / e + f) \quad (\text{рис. 3, } \epsilon), \quad (7)$$

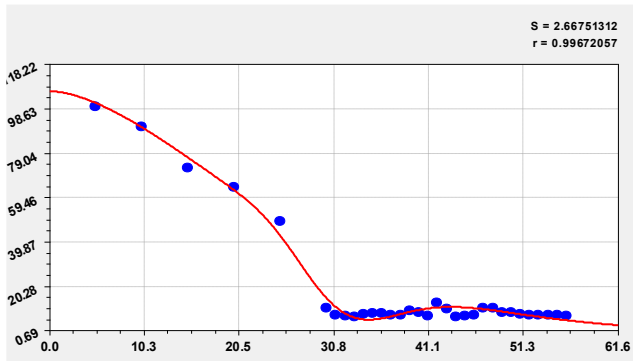
где коэффициенты:

$a = 2.97510412465E-045;$
 $b = 3.50694881571E+001;$
 $c = 3.60756806768E-001;$
 $d = 1.16506397600E+000;$
 $e = 3.29726787992E+000;$
 $f = 4.26349121772E+000.$

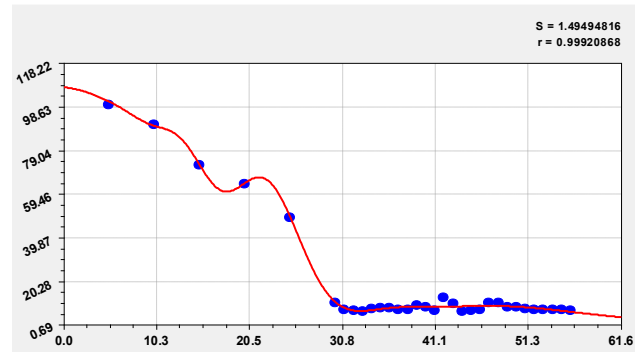
$$y = -a * x^b * \exp(-c * x^d) * \cos(\pi * x / (e + f * x^g) - h) \quad (\text{рис. 3, } \zeta), \quad (8)$$

где коэффициенты:

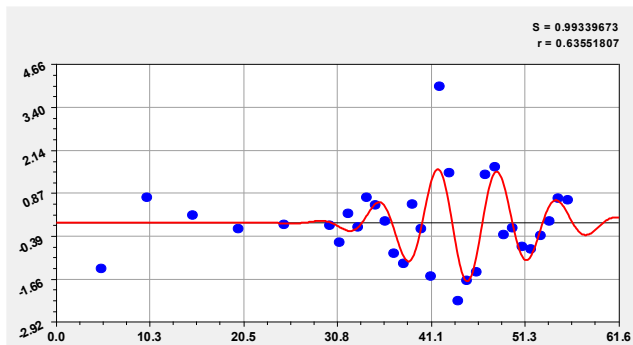
$a = 1.75257630552E-120;$
 $b = 9.91186589384E+001;$
 $c = 1.78303153399E+000;$
 $d = 1.06094207916E+000;$
 $e = 3.35880624862E-001;$
 $f = 7.21568922355E-003;$
 $g = 1.08595656532E+000;$
 $h = 1.56256649646E+001.$



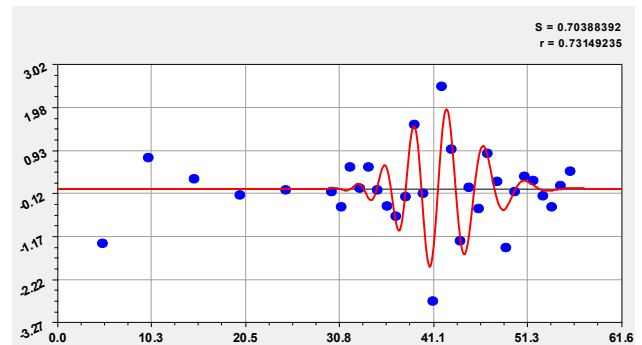
1. Двухчленный тренд



2. Тренд с одним колебанием



3. Четвертая волновая составляющая



4. Пятая волновая составляющая

Рис. 3. Графики модели динамики объемов вывозки древесины к пунктам сплава

Полученные математико-статистические модели (6), (7), (8) оцениваются по среднеквадратичным отклонениям S , а их уровень адекватности определяется коэффициентами корреляции r :

- 1) $S = 2,68; r = 0,997$ (рис. 3, a);
- 2) $S = 1,49; r = 0,999$ (рис. 3, b);
- 3) $S = 0,99; r = 0,636$ (рис. 3, ϵ);
- 4) $S = 0,70; r = 0,731$ (рис. 3, ζ).

Тогда для полученной модели (6), изображенной на рис. 3, b , коэффициент корреляции будет равным 0,999.

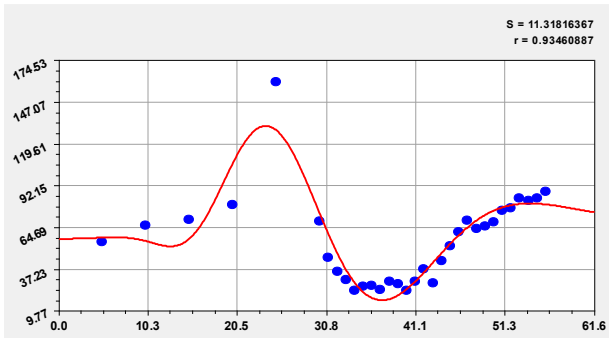
Согласно данным таблицы построена математико-статистическая модель вывозки древесины автомо-

бильным транспортом к пунктам потребления (рис. 4, a):

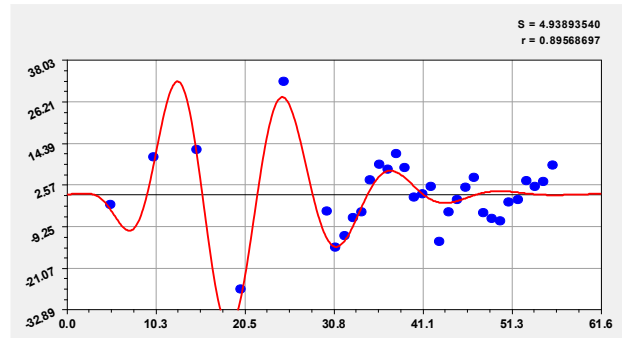
$$y = a * \exp(b * x) - c * x^{26.13288} * \exp(-d * x^{0.26045}) * \cos(\pi * x / (e - f * x^{0.042970}) - g), \quad (9)$$

где коэффициенты:

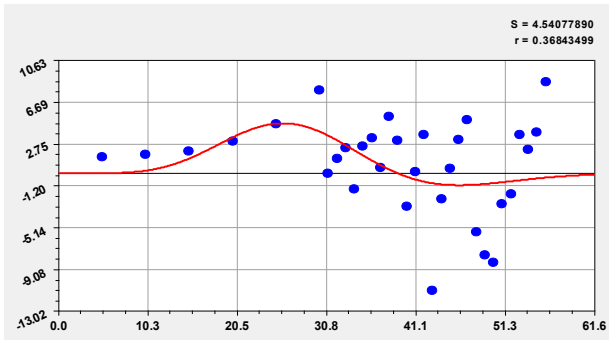
$a = 5.71410885614E+001;$
 $b = 3.53727651083E-003;$
 $c = 1.29257019020E+008;$
 $d = 4.25963505616E+001;$
 $e = -7.18890285011E+001;$
 $f = -7.13904456672E+001;$
 $g = 4.21111720176E+000.$



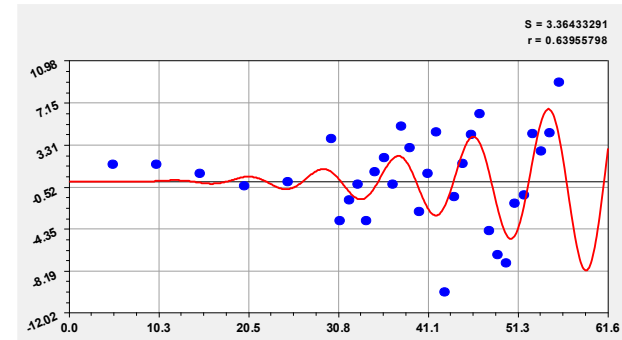
1. Одночленный тренд с одним колебанием



2. Третья составляющая



3. Четвертая волновая составляющая



4. Пятая волновая составляющая

Рис. 4. Графики модели динамики объемов вывозки древесины к пунктам потребления

Достоверность математической модели (9) подтверждается вычисленными минимальными дисперсиями и высокими коэффициентами корреляции:

- 1) $S = 11,32; r = 0,935$ (рис. 4, а);
- 2) $S = 4,94; r = 0,896$ (рис. 4, б);
- 3) $S = 4,54; r = 0,368$ (рис. 4, в);
- 4) $S = 3,36; r = 0,639$ (рис. 4, г).

Полученная математическая модель (9) на рис. 4, а оценивается высоким коэффициентом корреляции 0,935.

Важными показателями транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. является относительная доля вывозки лесных грузов различными видами транспорта [4; 26–30]. По статистическим данным (таблица) построена математико-статистическая модель доли объема вывозки древесины к железным дорогам (рис. 5, а):

$$y = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot x^d \cdot \exp(-e \cdot x^f) + g \cdot x^h \cdot \exp(-i \cdot x) \cdot \cos(\pi \cdot x / (j + k \cdot x^l) - m), \quad (10)$$

где коэффициенты:

- $a = 2.90598596177E+001;$
- $b = 3.60303561973E-003;$
- $c = 3.35309256697E-071;$
- $d = 6.06412472233E+001;$
- $e = 9.89845328193E-001;$
- $f = 1.10296096945E+000;$
- $g = 1.35010534905E-009;$
- $h = 8.31323734200E+000;$
- $i = 2.18144617302E-001;$
- $j = 8.85180235011E-002;$
- $k = 5.46422343392E-002;$
- $l = 8.04272877728E-001;$
- $m = 3.66077202111E+000.$

1. Вычисленные минимальные среднеквадратичные отклонения и высокие коэффициенты корреляции под-

тверждают доверительную вероятность полученной математической модели (10):

- 1) $S = 2,62; r = 0,989$ (рис. 5, а);
- 2) $S = 2,08; r = 0,427$ (рис. 5, б);
- 3) $S = 0,98; r = 0,886$ (рис. 5, в);
- 4) $S = 0,69; r = 0,709$ (рис. 5, г).

2. Следовательно, для модели (10) на рис. 5, а (тренд с одним колебанием) получим высокий коэффициент корреляции 0,989.

3. Составлена математико-статистическая модель доли объема вывозки древесины к пунктам сплава (рис. 6, а):

$$y = a \cdot \exp(-b \cdot x^c) - d \cdot x^e \cdot \exp(-f \cdot x^g) + h \cdot x^i \cdot \exp(-j \cdot x^k) \cdot \cos(\pi \cdot x / (l - m \cdot x^n) + o), \quad (11)$$

где коэффициенты:

- $a = 4.86679366337E+001;$
- $b = 7.40010536825E-003;$
- $c = 1.41941260898E+000;$
- $d = 4.54742752082E-018;$
- $e = 6.35979603941E+001;$
- $f = 5.05750552698E+001;$
- $g = 3.63507319506E-001;$
- $h = 2.08097613244E+002;$
- $i = 1.69485111779E+001;$
- $j = 2.10934727675E+001.$

Полученная математико-статистическая модель (11) подтверждается вычисленными минимальными дисперсиями и высокими коэффициентами корреляции:

- 1) $S = 1,24; r = 0,996$ (рис. 6, а);
- 2) $S = 0,969; r = 0,645$ (рис. 6, б);
- 3) $S = 1,11; r = 0,996$ (рис. 6, в);
- 4) $S = 0,62; r = 0,732$ (рис. 6, г).

Тогда, по вычисленным возможностям программной среды [23], для трехчленной модели (11) (рис. 6, а) получим наибольший коэффициент корреляции 0,996.

По статистическим данным (таблица) построена математико-статистическая модель доли объема вывозки древесины к пунктам потребления (рис. 7, в):

$$y = a * \exp(b * x) - c * x^d * \exp(-c * x^f) * \cos(\pi * x / (g - h * x^i) - j), \quad (12)$$

где коэффициенты:

a = 2.40612253064E+001;

b = 1.60714980828E-002;

c = 8.25810910442E-025;

d = 5.29847669678E+001;

e = 2.77361550440E+001;

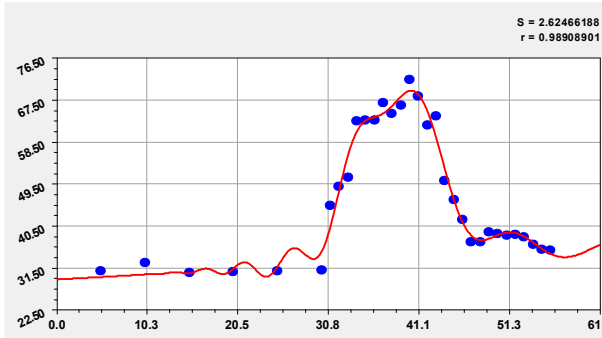
f = 4.32603405863E-001;

g = 4.27054123646E+002;

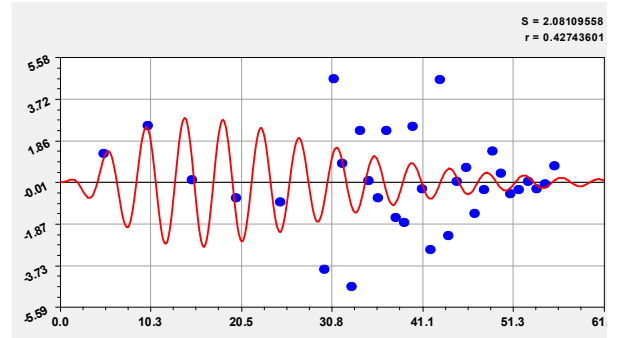
h = 1.19024768873E+002;

i = 3.13387159552E-001;

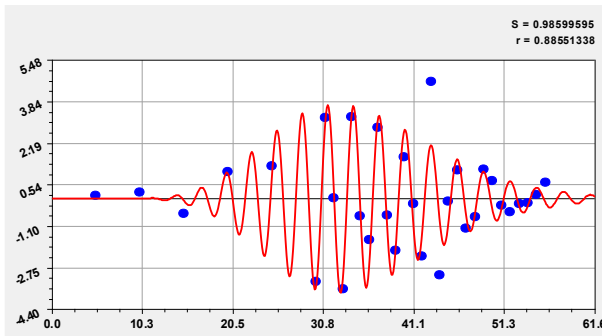
j = -3.29315857312E+000.



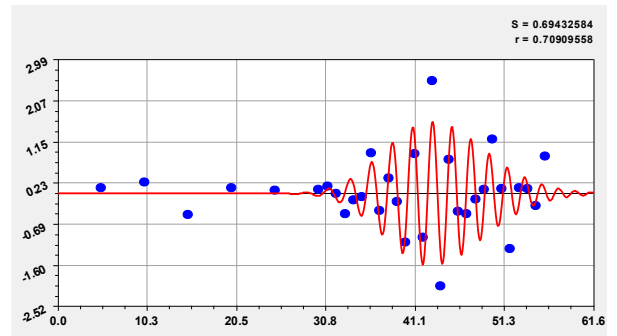
1. Тренд с одним колебанием



2. Четвертая волновая составляющая

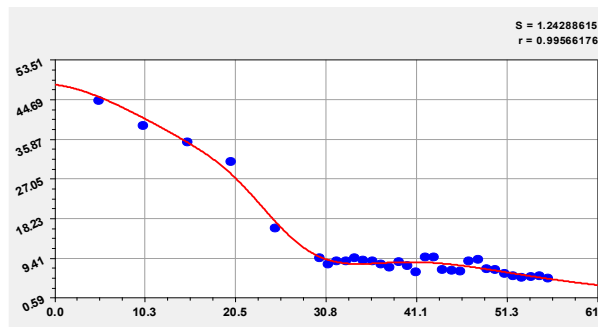


3. Пятая волновая составляющая

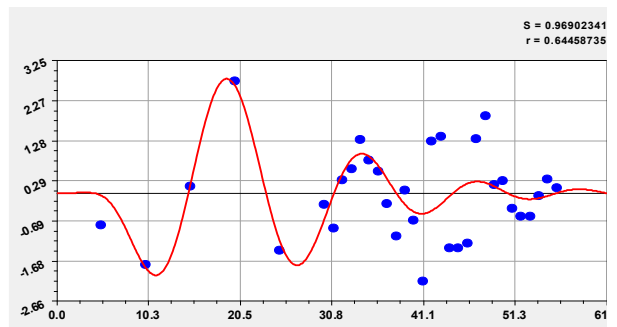


4. Шестая волновая составляющая

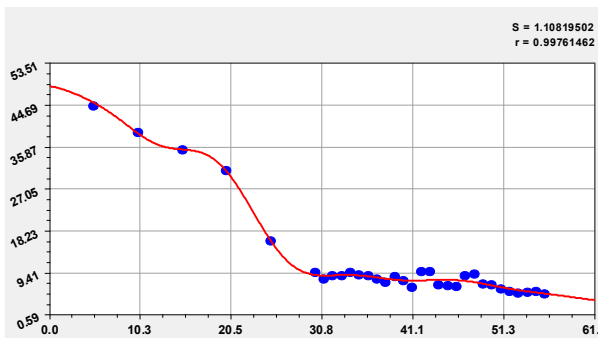
Рис. 5. Графики модели динамики и доли объемов вывозки древесины к железным дорогам



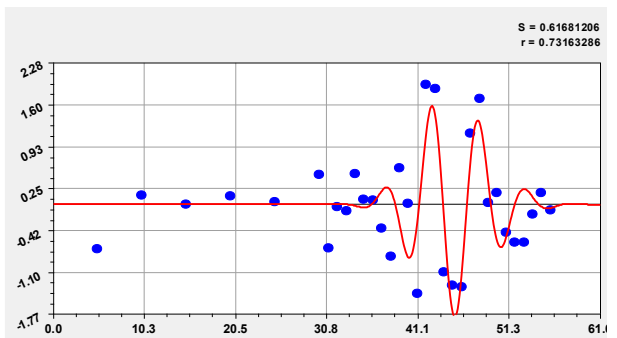
1. Двухчленный тренд



2. Одно колебание

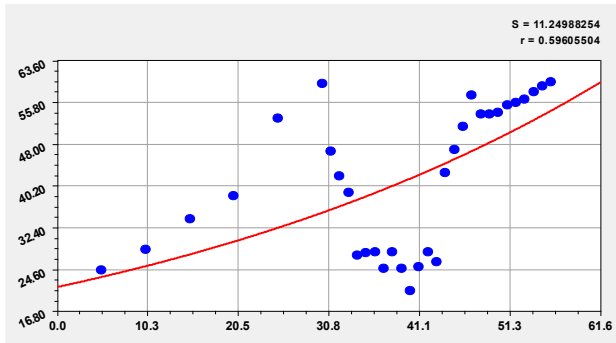


3. Тренд с одним колебанием

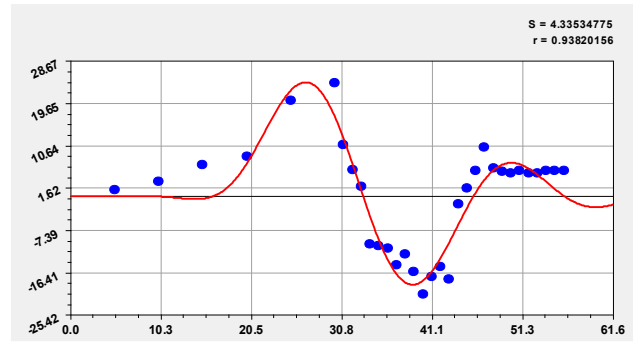


4. Четвертая волновая составляющая

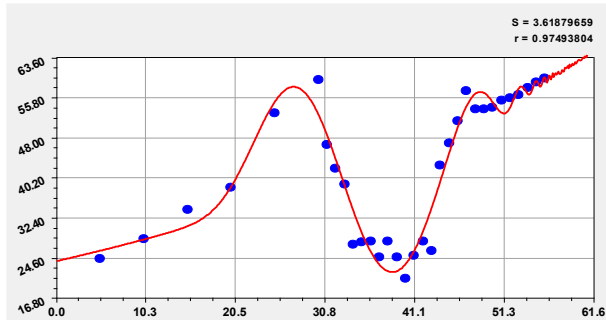
Рис. 6. Графики модели динамики доли объемов вывозки древесины к пунктам сплава



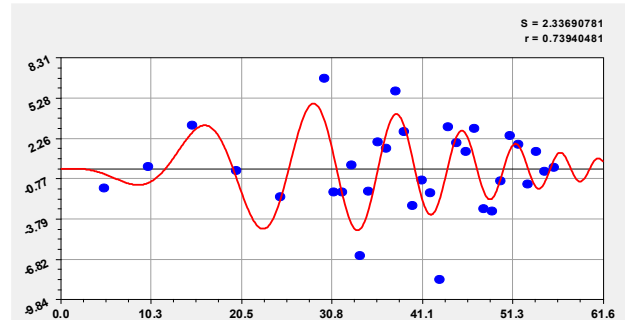
1. Одночленный тренд



2. Первое колебание



3. Тренд с одним колебанием



4. Третья волновая составляющая

Рис. 7. Графики модели динамики доли объемов вывозки древесины к пунктам потребления

Вычисленные минимальные дисперсии и высокие коэффициенты корреляции подтверждают достоверность математико-статистической модели (12):

- 1) $S = 11,25; r = 0,596$ (рис. 7, а);
- 2) $S = 4,34; r = 0,938$ (рис. 7, б);
- 3) $S = 3,62; r = 0,975$ (рис. 7, в);
- 4) $S = 2,34; r = 0,739$ (рис. 7, г).

Полученная математико-статистическая модель (12) на рис. 7, в оценивается высоким коэффициентом корреляции 0,975.

Прогнозирование объема вывозки древесины лесовозным транспортом до 2077 г. выполнялось на основе математико-статистической модели (2) (рис. 1, б) и ее графического выражения (рис. 8).



Рис. 8. График модели динамики объемов вывозки древесины лесовозным транспортом

За период с 1965 по 2021 гг. вывозка древесины в России лесовозным транспортом сократилась на 32,7 %, с 219,9 млн м³ до 148,0 млн м³, достигнув максимума — 304 млн м³ в 1990 г. (таблица). В основании прогноза наблюдается значительный рост объемов вывозки круглых лесоматериалов в 2 раза, с 78,26 млн м³

в 1988 г. до 150,75 млн м³ в 2026 г. Для горизонта прогноза ожидается медленный спад объемов вывозки древесины: до 142,01 млн м³ в 2040 г.; до 133,28 млн м³ в 2050 г.; до 124,98 млн м³ в 2060 г. и до 112,03 млн м³ в 2077 г.

Прогнозирование вывозки круглых лесоматериалов к железным дорогам выполнено на основе математико-статистической модели (5) (рис. 2, б) и ее графического выражения (рис. 9). В основании прогноза наблюдается значительный рост объемов вывозки круглых лесоматериалов в 2 раза, с 40,14 млн м³ в 1996 г. до 82,32 млн м³ в 2006 г., затем возникает колебательный процесс снижения объемов до 64,32 млн м³ в 2021 г.

Для горизонта прогноза ожидается затухающий колебательный процесс снижения объемов вывозки древесины: до 58,56 млн м³ в 2040 г.; до 57,58 млн м³ в 2050 г.; до 56,23 млн м³ в 2060 г. и до 53,98 млн м³ в 2077 г.



Рис. 9. График модели динамики объемов вывозки древесины к железным дорогам

Прогнозирование вывозки древесины к пунктам сплава выполнено по математико-статистической модели (6) на рис. 2, б и ее графического выражения (рис. 10). В ос-

новании прогноза перевозки лесных грузов водным транспортом резко сократились с 108,1 млн м³ до 7,4 млн м³ за период с 1965 по 2021 гг., что соответствует от 49,1 до 5,0 % от общего объема заготовленной древесины. Причины сокращения: запрещение молевого лесосплава по малым лесосплавным рекам; сезонный характер водных поставок древесного сырья за период навигации с 1.05 по 1.11 в течение 180 дней [4; 11; 18; 31].



Рис. 10. График модели динамики объемов вывозки древесины к пунктам сплава

Для горизонта прогноза с 2022 по 2077 гг. ожидается медленное сокращение вывозки древесины к пунктам сплава, что приведет к закрытию водного транспорта лесных грузов.

Прогнозирование вывозки древесины автомобильным транспортом к пунктам потребления проведено по математико-статистической модели (7) на рис. 4, а и ее графическом выражении (рис. 11). В основании прогноза наблюдается рост объемов вывозки древесины в 2 раза, с 57,14 млн м³ в 1965 г. до 160,1 млн м³ в 1990 г. Затем наступил затяжной спад в течении 15 лет до 25,53 млн м³ в 2005 г. До конца основания прогноза в течение 15 лет наблюдается медленный рост объемов вывозки древесины с 26,47 млн м³ в 2006 г. до 86,31 млн м³ в 2020 г.

Для горизонта прогноза с 2022 по 2077 гг. ожидается нарастающий колебательный процесс объемов вывозки древесины автомобильным транспортом во двор потребителей: до 62,96 млн м³ в 2040 г.; до 54,96 млн м³ в 2050 г.; до 67,92 млн м³ в 2060 г.; до 59,12 млн м³ в 2077 г.



Рис. 11. График модели динамики объемов вывозки древесины к пунктам потребления

Прогнозирование вывозки доли объема древесины к железным дорогам выполнено по математико-статистической модели (8) на рис. 5, а и ее графическое выражение (рис. 12). В основании прогноза с 1965 по 1995 гг. наблюдается стабилизация доли объема вывозки древесины к железным дорогам на уровне 30 % от общего объема вывозки. Затем происходит резкий рост вывозки до 72,37 % к 2005 г., после чего наступает спад к 2021 г. до 34,54 %. Для горизонта прогноза с 2022 по 2077 гг. ожидается плавное нарастание доли объема вывозки древесины к железным дорогам с 36,79 до 43,5 %.



Рис. 12. График модели динамики доли объемов вывозки древесины к железным дорогам



Рис. 13. Графики модели динамики доли объемов вывозки древесины к пунктам сплава

Прогнозирование вывозки доли объема древесины к пунктам сплава проведено по математико-статистической модели (9) на рис. 6, а и ее графического выражения (рис. 13).

В основании прогноза с 1965 по 2021 гг. наблюдается резкий спад вывозки древесины к пунктам сплава с 48,67 до 5,02 %. Для горизонта прогноза с 2022 по 2077 гг. ожидается медленный спад с 4,84 до 0,12 %, что свидетельствует о закрытии водного транспорта лесных грузов речным и морским транспортом.

Прогнозирование вывозки доли объема древесины автомобильным транспортом к пунктам потребления выполнялось по математико-статистической модели (10) на рис. 7, в и ее графического выражения (рис. 14).

В основании прогноза с 1965 по 1996 гг. в течение 32 лет наблюдается плавный рост вывозки с 24,06 до

53,17 %. Затем в течение 6 лет с 1997 по 2002 гг. происходит резкий спад показателя с 46,72 до 21,77 %. Начиная с 2005 по 2021 гг., в течение 18 лет наблюдается плавный рост с 23,5 до 58,97 %. Для горизонта прогноза с 2022 по 2077 гг. в течение 56 лет ожидается плавное нарастание доли объема вывозки древесины автомобильным транспортом к пунктам потребления с 60,6 до 100 % к 2050 г. Этот факт означает, что в период до 2050 г. в лесном комплексе произойдет смена доктрины заготовки круглых лесоматериалов. Возможно также, что изменятся приоритеты деятельности лесного комплекса России.



Рис. 14. Графики модели динамики доли объемов вывозки древесины к пунктам потребления

Сопоставление трех видов транспорта лесоматериалов (таблица) предприятиями лесного комплекса России показывает резкий спад объемов перевозки древесины водным транспортом, стабилизацию перевозок железнодорожным и рост перевозок автомобильным транспортом древесины во двор потребителя на небольшие расстояния.

Заключение. За период с 1965 по 2021 гг. вывозка древесины в России лесовозным транспортом сократилась на 32,7 %, с 219,9 млн м³ до 148,0 млн м³, достигнув максимума — 304 млн м³ в 1990 г. (таблица). Сопоставление трех видов транспорта лесоматериалов (таблица) предприятиями лесного комплекса России показывает резкий спад объемов перевозки древесины вод-

ным транспортом, стабилизацию перевозок железнодорожным и рост перевозок автомобильным транспортом древесины во двор потребителя на небольшие расстояния.

Составленные математико-статистические модели (2...10 и таблица) с фактическими данными вывозки древесины позволяют прогнозировать развитие лесотранспортной структуры лесного комплекса России на ближайшую перспективу до 2077 г.

Поставки лесных грузов потребителям железнодорожным транспортом стабилизировались за последние 20 лет на уровне от 50 до 80 млн м³. В перспективе данные показатели сохраняются до 2077 г.

Перевозки лесных грузов водным транспортом резко сократились с 108,1 млн м³ до 7,4 млн м³ за период с 1965 по 2021 гг., что соответствует от 49,1 до 5,0 % от общего объема заготовленной древесины. В перспективе ожидается медленное сокращение вывозки древесины к пунктам сплава, что приведет к закрытию водного транспорта лесных грузов речным и морским транспортом.

Поставки круглых лесоматериалов к пунктам потребления автомобильным транспортом выросли с 52,5 млн м³ до 88,4 млн м³ в основании прогноза с 1965 по 2021 гг.. В перспективе перевозки лесных грузов автомобильным транспортом вырастут с 59,7 до 100 % к 2050 г., что свидетельствует о возможной смене доктрины заготовки круглых лесоматериалов в лесном комплексе России.

Итерация результатов прогнозирования вывозки древесины по прошлым данным функционирования лесного комплекса Российской Федерации позволяет значительно повысить точность определения путей развития его лесотранспортной структуры до 2077 г. При этом периодичность повторных прогнозов должна быть не менее 2–3 лет.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00568 «Методы и интеллектуальная система поддержки динамической устойчивости операторов эргатических систем» (<https://rscf.ru/project/23-19-00568>).

Литература

1. Кожемяко Н.П. Концентрация лесных ресурсов Российской Федерации и эффективность их использования // Лесной вестн. Forestry bulletin. 2008. № 5 (62). С. 124-127.
2. Шварц Е.А., Ярошенко А.Ю., Замолотчиков Д.Г., Шматов Н.М. О новой стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года // Устойчивое лесопользование. 2021. № 1 (65). С. 2-6.
3. Кожемяко Н.П., Кузнецов С.Г., Кошыхакова С.А. Концептуальная модель прогнозирования развития лесного сектора России // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5, № 4. С. 252-266.
4. Камусин А.А., Суров Г.Я., Войтко П.Ф. Транспорт лесных грузов по внутренним водным путям: моногр. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технологический ун-т, 2017. 476 с.
5. Кожемяко Н.П., Кондратюк В.А. Научно-техническое и инновационное развитие лесного комплекса России: состояние, проблемы, перспективы // Лесной экономической вестн. 2008. № 2 (56). С. 15-18.
6. Бурдин Н.А. О стратегических направлениях развития лесного комплекса Российской Федерации // Лесной вестн. Forestry bulletin. 2008. № 5 (62). С. 7-12.
7. Бурдин Н.А., Саханов В.В., Демешкан Е.Ю. О стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации // Лесной экономической вестн. 2008. № 2 (56). С. 3-15.
8. Соколов В.А., Горяева Е.А., Втюрина О.П. О стратегии развития лесного комплекса России // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 3, № 1. С. 223-233.
9. Григорьев И. Комментарии к стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года // Бюллетень Ассоциации «ЛЕСТЕХ». 2021. № 5. С. 38-48.

10. Новоселов И. Кому бросает вызов «Стратегия развития лесного комплекса России до 2030 года» // ЛесПромИнформ. 2017. № 7 (129). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4813> (дата обращения: 22.07.2023).
11. Войтко П.Ф., Гайсин И.Г. Первоначальный лесосплав по малым рекам: моногр. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технологический ун-т, 2016. 458 с.
12. Петров А., Аким Э., Бурдин Н., Воропаев А., Исаев А., Кожемяко Н., Кондратюк В., Коровин Г., Куликова Е., Лобовиков М., Лукина Н., Мартынюк А., Моисеев Б., Моисеев Н., Санаев В., Саханов В., Филипчук А., Чуйко В., Швиденко А., Шматов Н. Прогноз развития лесного сектора Российской Федерации до 2030 года: моногр. Рим: ФАО, 2012. 96 с.
13. Кузнецов С.Г. Модели и индикаторы развития лесного сектора России // Экономика и предпринимательство. 2015. № 6-1. С. 142-145.
14. Войтко П.Ф., Мазуркин П.М. Пути развития водного транспорта лесоматериалов // Лесная пром-сть. 2004. № 4. С. 14-16.
15. Сабанцев Ю.Н., Мазуркин П.М. Статистическое моделирование лесозаконоomicеских данных. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. 389 с.
16. Мазуркин П.М. Статистическое моделирование. Эвристико-математический подход. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. 100 с.
17. Мазуркин П.М. Закономерности устойчивого развития. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 302 с.
18. D'Amours S., Rönnqvist M., Weintraub A. Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry // Infor. 2008. V. 46, № 4. P. 265-281.
19. Войтко П.Ф., Мазуркин П.М., Гайсин И.Г. Прогнозирование водных поставок лесоматериалов потребителям // Вестн. МГУЛ. Лесной вестн. 2014. № 2. С. 132-138.
20. Mazurkin P.M. Identification of statistical steady regularities // Science and world: international scientific magazine. 2013. № 3 (3). P. 28-33.
21. Справочный материал о лесосплаве и перевалке леса по Минлесбумпрому СССР. М.: Лесная пром-сть, 1990. 128 с.
22. Mazurkin P.M. Wavelet Analysis Statistical Data. Advances in Sciences and Humanities. 2015. V. 1, № 2. P. 30-44.
23. Mazurkin P.M. Methods for the identification of asymmetric wavelets and factor analysis on the example of the monthly dynamics of the greenhouse gases of Antarctica // International Journal of Development Research. 2019. V. 9, iss. 11. P. 31081-31098.
24. Mokhiev A., Mazurkin P., Rukomojnikov K. Factor analysis of the parameters of the ergatic natural-production system of the carting out of timber assortments // International Journal of Forest Engineering. 2022. V. 33, № 2. P. 155-168.
25. Мохирев А.П., Рукомойников К.П., Мазуркин П.М. Анализ факторов, влияющих на скорость автолесовозов // Успехи современного естествознания. 2020. № 11. С. 20-25.
26. Мишарин А.С., Евсеев О.В. Актуализация Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года // Транспорт РФ. 2013. № 2. С. 4-13.
27. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savel'eva M.N. Optimization of flows in transport systems. Proceedings of SFedU. Engineering sciences. 2014. № 5 (154). P. 161-167.
28. Forsberg M., Frisk M., Rönnqvist M. FlowOpt - a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry // International Journal of Forest Engineering. 2005. № 16 (2). P. 101-114.
29. Mokhiev A.P., Gerasimova M.M., Pozdnyakova M. Finding the optimal route of wood transportation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 226, conference 1.
30. Sushkov S.I., Burmistrova O.N., Pil'nik YU.N. Optimization of Transport Process Parameters at Enterprises of the Timber Industry Complex. Fundamental Research. 2015. № 11. P. 237-241.
31. Соколов О.М., Митрофанов А.А., Рымашевский В.Л. Проблемы и перспективы транспортного развития лесопромышленного комплекса // Лесной журнал. 2004. № 3. С. 37-42.

References

1. Kozhemyako N.P. Concentration of forest resources of the Russian Federation and the effectiveness of their use // Lesnoj vestn. Forestry bulletin. 2008. № 5 (62). P. 124-127.
2. SHvarc E.A., YAroshenko A.YU., Zamolodchikov D.G., SHmatkov N.M. About the new Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030 // Ustojchivoe lesopol'zovanie. 2021. № 1 (65). P. 2-6.
3. Kozhemyako N.P., Kuznecov S.G., Kosh'shakova S.A. Conceptual model of forecasting the development of the Russian forest sector // Forestry Engineering Journal. 2015. V. 5, № 4. P. 252-266.
4. Kamusin A.A., Surov G.YA., Vojtko P.F. Transport of forest goods by inland waterways: monogr. Joshkar-Ola: Povolzhskij gos. tekhnologicheskij un-t, 2017. 476 p.
5. Kozhemyako N.P., Kondratyuk V.A. Scientific, technical and innovative development of the Russian forest complex: state, problems, prospects // Lesnoj ekonomicheskij vestn. 2008. № 2 (56). P. 15-18.
6. Burdin N.A. On strategic directions of development of the forest complex of the Russian Federation // Lesnoj vestn. Forestry bulletin. 2008. № 5 (62). P. 7-12.
7. Burdin N.A., Sahanov V.V., Demeshkan E.YU. On the development strategy of the forest complex of the Russian Federation // Lesnoj ekonomicheskij vestn. 2008. № 2 (56). P. 3-15.
8. Sokolov V.A., Goryaeva E.A., Vtyurina O.P. On the development strategy of the Russian forest complex // Interekspo Geo-Sibir'. 2019. V. 3, № 1. P. 223-233.
9. Grigor'ev I. Comments on the strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030 // Byulleten' Associacii «LESTEKH». 2021. № 5. P. 38-48.
10. Novoselov I. Who is challenged by the "Strategy for the development of the Russian forest complex until 2030"? // LesPromInform. 2017. № 7 (129). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4813> (data obrashcheniya: 22.07.2023).
11. Vojtko P.F., Gajsin I.G. Initial logging on small rivers: monogr. Joshkar-Ola: Povolzhskij gos. tekhnologicheskij un-t, 2016. 458 p.
12. Petrov A., Akim E., Burdin N., Voropaev A., Isaev A., Kozhemyako N., Kondratyuk V., Korovin G., Kulikova E., Lobovikov M., Lukina N., Martynuk A., Moiseev B., Moiseev N., Sanaev V., Sahanov V., Filipchuk A., CHujko V., SHvidenko A., SHmatkov N. Forecast of the development of the forest sector of the Russian Federation until 2030: monogr. Rim: ФАО, 2012. 96 p.
13. Kuznecov S.G. Models and indicators of the development of the Russian forest sector // Economy and entrepreneurship. 2015. № 6-1. P. 142-145.
14. Vojtko P.F., Mazurkin P.M. Ways of development of water transport of timber // Lesnaya prom-st'. 2004. № 4. P. 14-16.

15. Sabancev YU.N., Mazurkin P.M. Statistical modeling of forest economic data: scientific publication. Joshkar-Ola: MarGTU, 2001. 389 p.
16. Mazurkin P.M. Statistical modeling. Heuristic-mathematical approach: scientific publication. Joshkar-Ola: MarGTU, 2001. 100 p.
17. Mazurkin P.M. Patterns of sustainable development: scientific publication. Joshkar-Ola: MarGTU, 2002. 302 p.
18. D'Amours S., Rönnqvist M., Weintraub A. Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry // Infor. 2008. V. 46, № 4. P. 265-281.
19. Vojtko P.F., Mazurkin P.M., Gajsin I.G. Forecasting of water supplies of timber to consumers // Forestry bulletin. 2014. № 2. P. 132-138.
20. Mazurkin P.M. Identification of statistical steady regularities // Science and world: international scientific magazine. 2013. № 3 (3). P. 28-33.
21. Reference material on timber melting and transshipment of timber by the Ministry of Forestry of the USSR. M.: Lesnaya prom-st', 1990. 128 p.
22. Mazurkin P.M. Wavelet Analysis Statistical Data. Advances in Sciences and Humanities. 2015. V. 1, № 2. P. 30-44.
23. Mazurkin P.M. Methods for the identification of asymmetric wavelets and factor analysis on the example of the monthly dynamics of the greenhouse gases of Antarctica // International Journal of Development Research. 2019. V. 9, iss. 11. P. 31081-31098.
24. Mokhiev A., Mazurkin P., Rukomojnikov K. Factor analysis of the parameters of the ergatic natural-production system of the carting out of timber assortments // International Journal of Forest Engineering. 2022. V. 33, № 2. P. 155-168.
25. Mohiev A.P., Rukomojnikov K.P., Mazurkin P.M. Analysis of factors affecting the speed of logging trucks // Advances in current natural sciences. 2020. № 11. P. 20-25.
26. Misharin A.S., Evseev O.V. Actualization of the Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 // Transport RF. 2013. № 2. P. 4-13.
27. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savel'eva M.N. Optimization of flows in transport systems. Proceedings of SFedU. Engineering sciences. 2014. № 5 (154). P. 161-167.
28. Forsberg M., Frisk M., Rönnqvist M. FlowOpt - a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry // International Journal of Forest Engineering. 2005. № 16 (2). P. 101-114.
29. Mokhiev A.P., Gerasimova M.M., Pozdnyakova M. Finding the optimal route of wood transportation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 226, conference 1.
30. Sushkov S.I., Burmistrova O.N., Pil'nik YU.N. Optimization of Transport Process Parameters at Enterprises of the Timber Industry Complex. Fundamental Research. 2015. № 11. P. 237-241.
31. Sokolov O.M., Mitrofanov A.A., Rymashevskij V.L. Problems and prospects of transport development of the timber industry complex // Forest Journal. 2004. № 3. P. 37-42.