

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 630*338.2

DOI:10.18324/2077-5415-2020-4-88-96

Многофакторное влияние природно-производственных условий на скорость движения автолесовозов

А.П. Мохирев^{1а}, К.П. Рукомойников^{2б}, П.М. Мазуркин^{2с}¹ Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, ул. Победы, 29, Лесосибирск, Россия² Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, 3, Йошкар-Ола, Республика Марий Эл
^а ale-mokhirev@yandex.ru, ^б rukomojnikovkp@volgatech.net, ^с kaf_po@mail.ru^а <https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-0177-5521>

Статья поступила 14.10.2020, принята 22.10.2020

Приведена иерархическая структура многофакторной модели влияния на скорость движения лесовозов различных параметров состояния дорожного покрытия, квалификации водителя, погодных и других природно-производственных условий. Объектом исследования являлась природно-эргатическая система «Вывозка лесоматериалов по автомобильным дорогам». Всего учитывался 31 параметр, наиболее полно характеризующий условия процесса вывозки древесины. Предметом исследования являлись нелинейные закономерности с волновыми составляющими влияния параметров системы на скорость движения 18 лесовозных автопоездов на 64 участках двух автомобильных дорог. В идентификации закономерностей были использованы измеренные данные о скорости движения автолесовозов при вывозке древесины с лесной территории на береговые нижние склады во время лесозаготовительного сезона 2019–2020 гг. по территории Мотыгинского и Енисейского лесничеств Красноярского края. Для выявления зависимостей скорости движения от всех рассматриваемых факторов, а также создания многофакторной иерархической модели выполнено 162 измерения в различных природно-производственных условиях. Моделирование выполнялось методом идентификации закономерностей в виде последовательности асимметричных вейвлет-сигналов. Идентификация влияния множества из 31 учебного фактора на скорость лесовоза выполнена двумя способами: 1) выявление однофакторных закономерностей парных влияний типа «фактор – скорость», автоматическое получение адекватности выявленной закономерности по коэффициенту корреляции в программной среде CurveExpert-1.40, а затем ранжирование факторных связей по убыванию значений коэффициента корреляции; 2) после выполнения п. 1 первая закономерность с максимальным коэффициентом корреляции принимается без изменения, а затем последовательно выполняется идентификация путем подстановки в остатки (ордината – скорость) от предыдущей формулы последующей в рейтинге однофакторной модели (абсцисса). Так продолжается вплоть до последнего учебного фактора в рейтинге по п. 1. В результате была предложена многофакторная модель, характеризующая общую зависимость скорости движения лесовозов от анализируемых факторов. Факторный анализ параметров, влияющих на показатель в виде скорости движения лесовозов с грузом и без него, позволил выявить, что наибольшее влияние оказывают факторы, характеризующие дорожные условия. По общей модели можно рассчитать чистое время, необходимое на доставку древесины по маршруту.

Ключевые слова: скорость лесовоза; природно-производственные условия; вейвлет-анализ; рейтинг; общая модель.

Multi-factor analysis of the impact of natural and industrial conditions on the speed of logging trucks

A.P. Mokhirev^{1а}, K.P. Rukomojnikov^{2б}, P.M. Mazurkin^{2с}¹ Lesosibirsk Branch of Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev; 29, Pobedy St., Lesosibirsk, Russia² Volga State University of Technology; 3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Republic of Marii El^а ale-mokhirev@yandex.ru, ^б rukomojnikovkp@volgatech.net, ^с kaf_po@mail.ru^а <https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-0177-5521>

Received 14.10.2020, accepted 22.10.2020

The hierarchical structure of a multi-factor model of the influence of various parameters of the road surface condition, driver qualification, weather and other natural and industrial conditions on the speed of logging trucks is given. The object of the study is the natural-ergatic system "Transportation of timber by road". In total, 31 parameters are taken into account. They most fully characterize the conditions of the wood removal process. The subject of the study is nonlinear regularities with wave components of the influence of system parameters on the speed of 18 logging road trains on 64 sections of two highways. In order to identify the patterns, measured data on the speed of logging trucks when transporting wood from the forest territory to the lower coastal warehouses during the 2019-

2020 logging season on the territory of the Motygin'sky and Yenisey forest districts of the Krasnoyarsky territory were used. 162 measurements have been performed in various natural and industrial conditions to identify the speed dependences on all the factors under consideration, as well as a multi-factor hierarchical model. The simulation has been performed by identifying patterns in the form of a sequence of asymmetric wavelet signals. Identification of the influence of a set of 31 factors taken into account on the speed of the logging truck is fulfilled in two ways: 1) identification of univariate patterns of the paired influences of the "factor – speed" automatic acquisition of the adequacy of sun-dried patterns on the correlation coefficient in the software environment CurveExpert-1.40 and then ranking factor links by descending values of the correlation coefficient; 2) after compliance with clause 1, the first pattern with the maximum correlation coefficient is accepted without change, and then identification is performed sequentially by substituting the remainder (ordinate-rate) from the previous formula of the subsequent one - factor model in the rating (abscissa). This continues up to the last factor taken into account in the rating according to item 1. as a result, a multi-factor model was proposed that characterizes the overall dependence of the speed of logging trucks on the analyzed factors. Factor analysis of the parameters that affect the indicator in the form of the speed of movement of timber trucks with and without cargo revealed that the factors that characterize road conditions have the greatest impact. Using the general model, it is possible to calculate the net time required to deliver wood along the route.

Keywords: logging truck speed; natural production conditions; wavelet analysis; rating; general model.

Введение. Транспортно-технологические процессы в лесозаготовительном производстве зависят от большого количества природно-производственных, технико-экономических факторов [1–3]. Неблагоприятные условия приводят к снижению производительности технологических машин и увеличению себестоимости и других параметров производства [4–6].

Все факторы можно разделить на две группы: управляемые факторы, связанные с деятельностью человека (состояние дорожного покрытия, геометрические параметры дороги, пересечения и примыкания дорог), и неуправляемые, которые основываются на природно-климатических условиях.

Производительность лесовозного транспорта, или его скорость движения, является одним из основных показателей, характеризующих эффективность технологического процесса при освоении лесных ресурсов. На скорость передвижения транспорта влияют условия движения на дорогах, которые существенно усложняются при неблагоприятных метеорологических явлениях [7–9].

Чем выше категория дороги, интенсивность и скорость движения, тем меньшее влияние оказывают природно-климатические факторы на режим движения.

В связи с этим актуальна задача разработки математических зависимостей для расчета скорости лесовозного транспорта. На сегодняшний день опубликованы труды многих ученых, посвященные данному вопросу. В работах [11–13] приведены зависимости для определения скорости лесовозного автопоезда во всех режимах движения с учетом факторов, влияющих на его показатели. Полученные результаты характеризуются высокой точностью и приближенностью к реальным значениям. Однако влияние природно-климатических факторов в данных исследованиях отражено частично. Такой взгляд на решение поставленной задачи можно назвать односторонним, так как в условиях отечественной лесозаготовительной отрасли проблема сезонности является определяющей в вопросе вывозки древесины.

В исследованиях [14; 15] рассматриваются характеристики автомобильных дорог, по которым производится вывозка лесоматериалов. Авторы выявляют закономерности в изменении скоростных режимов движущихся транспортных средств на основании практических наблюдений за отдельными участками дороги. Полученные зависимости можно использовать для моделирования движения лесовозной техники. Такой

подход, основанный на практических наблюдениях и проекции результатов на аналогичные ситуации, является научно обоснованным и часто применяется на практике. Однако точность расчетов не является достаточно высокой для практического применения, использования в математическом или компьютерном моделировании в связи с тем, что на практике имеет место взаимное влияние факторов. Поэтому выделить влияние отдельно взятого фактора для проекции его на другую ситуацию становится сложно и нереализуемо на практике.

Авторы при составлении эмпирических моделей используют экспериментальные наблюдения за отдельными участками дороги для выявления закономерностей в изменении скоростных режимов движущихся транспортных средств. В работе [15] приведены математические зависимости, описывающие влияние климатических факторов на скорость разных типов лесовозов. Однако в известных исследованиях не представлен системный анализ с выделением групп факторов природно-производственных условий, воздействующих на скоростной режим лесовоза.

Целью настоящих исследований является нахождение зависимости скорости движения автомобильных лесовозов от природно-производственных условий в динамической среде измерений с выявлением асимметрических вейвлетов по изменению скорости движения на экспериментальных участках лесовозных автомобильных дорог.

При этом идентификация влияния множества учетных факторов на скорость лесовоза выполнена двумя способами:

1) выявление закономерностей парных влияний типа «фактор – скорость», автоматическое получение адекватности выявленной закономерности по коэффициенту корреляции в программной среде CurveExpert-1.40, а затем ранжирование факторных связей скорости по убыванию значений коэффициента корреляции;

2) после выполнения п. 1 — выбор закономерности с максимальным коэффициентом корреляции, а затем последовательно идентификация закономерностей путем подстановки в остаток (ордината) от предыдущей формулы, последующей в рейтинге по п. 1 фактора (абсцисса), и т. д. вплоть до последнего учетного фактора.

При первом способе получаем комплекс однофакторных закономерностей, во втором случае — много-

факторное уравнение в виде аддитивной (в виде суммы закономерностей предыдущих остатков от последующего фактора) математической модели. В обоих случаях влияющие факторы становятся независимыми переменными.

Материалы и методы. Объектом исследования является природно-эргатическая система [16; 17] «Вывозка лесоматериалов по автомобильным дорогам», включающая следующие подсистемы с группами параметров, влияющих на скорость движения лесовоза (табл. 1):

– время въезда на измеряемый участок (X1 – X3);

– приведенные координаты участка (X4 – X6);
– параметры водителя (X7 – X9);
– параметры лесовоза (X10 – X18);
– характеристика дорожного покрытия (X19 – X23);
– состояние покрытия (X24 – X25);
– метеорологические данные (X26 – X31).

Система факторов наиболее полно характеризует дорожное покрытие, лесовозы, водителей, а также различные условия процесса вывозки древесины специальными автомобилями.

Фрагмент таблицы исходных данных показан в табл. 1.

Таблица 1. Фрагмент таблицы исходных данных для идентификации закономерностей

Номер опыта		1	2	...	162
Время въезда на участок дороги	X1 – номер месяца в году	6	7		3
	X2 – номер суток в месяце	9	13		30
	X3 – номер часа в сутках	17,5	0,9		2,85
Приведенные координаты центра участка	X4 – широта (за 0 взята 57,93099)	0,77305	0,75343		0,47915
	X5 – долгота (за 0 взята 90,70971)	4,35617	4,5169		1,22367
	X6 – высота над уровнем моря, м	476	403		82
Параметры водителя	X7 – стаж работы водителя, лет	3	14		3
	X8 – возраст водителя, лет	28	48		28
	X9 – время в пути, ч	6	3		15
Параметры лесовоза	X10 – колесная формула автолесовоза (0 — 6x6, 1 — 6x4)	0	0		1
	X11 – грузоподъемность автолесовоза, т	49	56		20
	X12 – тип кузова (1 — тягач; 2 — прицеп; 3 — полуприцеп)	2	3		1
	X13 – время эксплуатации автолесовоза, лет	3,5	2,17		2,83
	X14 – мощность двигателя автолесовоза, л.с.	350	420		300
	X15 – пробег автолесовоза, тыс. км	65	42		40
	X16 – время, пройденное после капремонта лесовоза, мес.	8	9		9
	X17 – нагруженность (масса груза / грузоподъемность)	0,93	0,94		0,9
Характеристика дорожного покрытия	X18 – тип шин (0 — 425/85r21; 1 — 14.00/r20 xml)	1	0		0
	X19 – тип покрытия (0 — без; 1 — гравийное; 2 — асфальт)	1	1		1
	X20 – ширина дороги, м	7	6		8
	X21 – время эксплуатации дороги с момента строительства, лет	3,8	1		37,4
	X22 – количество капитальных ремонтов дороги с момента ее строительства, шт.	0	0		3
Состояние покрытия	X23 – уклон дороги, ‰	–40	–40		0
	X24 – влажность покрытия дороги (0 — сухое; 1 — влажное; 2 — сырое; 3 — мокрое; 4 — насыщенное водой)	0	1		0
Метеорологические данные	X25 – вид снежно-ледяного покрытия (0 — без снега; 1 — уплотненный снег; 2 — снежное сухое; 3 — мокрый снег; 4 — снежно-ледяное)	0	0		2
	X26 – температура воздуха, °С	23	10,6		–1,8
	X27 – атмосферное давление, мм.рт.ст.	373	749		756
	X28 – относительная влажность на высоте 2 м, %	44	94		91
	X29 – скорость ветра, м/с	1	1		2
	X30 – горизонтальная дальность видимости, км	50	9		30
	X31 – количество осадков, выпавших за 12 ч, мм	0	0		0

Предмет исследования — закономерности влияния параметров системы на скорость движения лесовозного автопоезда. В ходе исследования использованы данные о скорости движения автолесовозов при вывозке древесины с лесной территории на береговые нижние склады во время лесозаготовительного сезона 2019–2020 гг.

по территории Мотыгинского и Енисейского лесничеств Красноярского края (см. рис. 1).

Сведения о погоде принимались на электронном ресурсе www.rp5.ru по соответствующим метеорологическим постам (Енисейский, Мотыгинский).

Значения всех учтенных в экспериментах парамет-

ров фиксируются одновременно. Значения, представляемые для идентификации нелинейных закономерностей, приводятся в таблице исходных данных в Excel. Для выявления зависимостей скорости автолесовоза от всех рассматриваемых факторов, а также многофакторной модели выполнено 162 наблюдения, за-

ключающихся в измерениях скорости лесовоза в различных природно-производственных условиях. Исследования проводились при условиях: участок без поворотов более 300 м, анализируемый уклон постоянный на этом участке. При этом достигается равномерная скорость на участке.

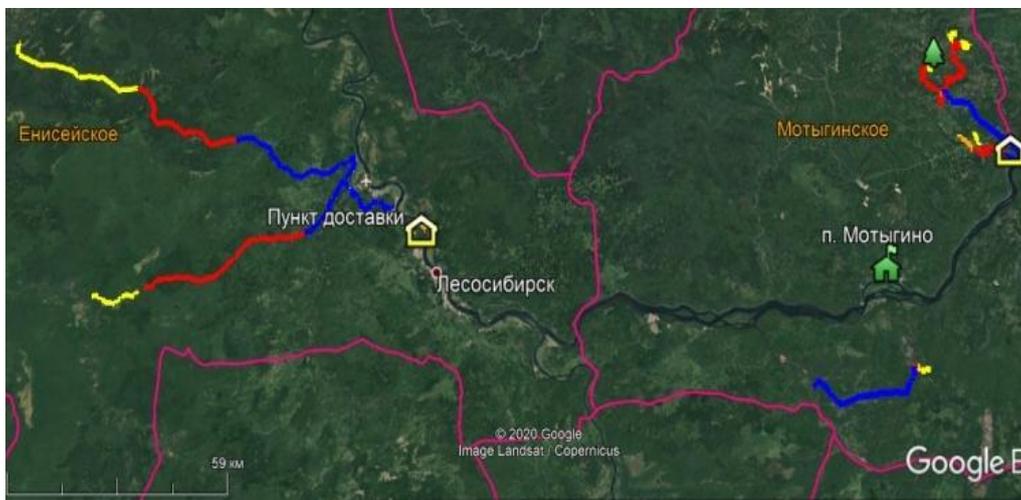


Рис. 1. Местонахождение лесовозных дорог

- дорога с асфальтовым покрытием
- дорога с грунтовым покрытием
- дорога без покрытия
- пункт доставки древесины

Уклон дороги и высота над уровнем моря фиксируются в программе GoogleEarthPro [16] с предварительным обозначением на транспортном пути фиксажных точек на карте (рис. 2).

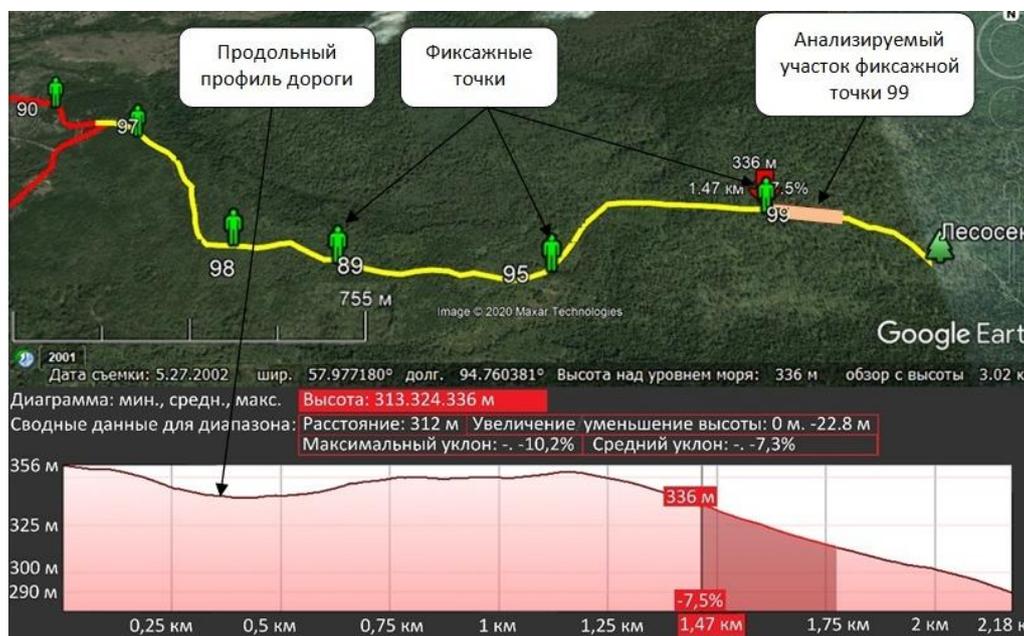


Рис. 2. Продольный профиль лесовозной дороги с участками измерений

В процессе идентификации по принципу от простого к сложному из представленных в табл. 2 инвариантов (фрагментов) составляется сложное алгебраическое уравнение. Фрагменты могут быть использованы как со знаком «+», так и «-». Инварианты колебательных возмущений в виде асимметричных вейвлет-сигналов также включают в себя такие конструкты из табл. 2, как амплитуда (половина) и полупериод. По состав-

ленным уравнениям автоматически выполняется в программной среде CurveExpert-1.40 поиск значения параметров модели в виде однофакторной зависимости.

Из отдельных компонентов строится общая модель [16; 19; 20] в виде асимметричного вейвлет-сигнала:

$$y_i = A_i \cos(\pi x / p_i - a_{si}),$$

$$A_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}), \quad p_i = a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}, \quad (1)$$

где y — показатель (зависимый фактор); i — номер члена модели (1); m — количество членов в модели (1), достигающее до 200 и более; x — объясняющая переменная (влияющий фактор); $a_1...a_8$ — параметры волновой модели (1), принимающие числовые значения в ходе структурно-параметрической идентифика-

ции в широко известной программной среде CurveExpert-1.40 (www.curveexpert.net); A_i — амплитуда (половина) вейвлета (ось y); p_i — полупериод колебания в виде асимметричного вейвлета (ось x).

Таблица 2. Математические конструкты (исходные инварианты) для составления модели [20]

Фрагменты без предыстории изучаемого явления или процесса	Фрагменты с предысторией изучаемого явления или процесса
$y = ax$ — закон линейного роста или спада (при отрицательном знаке перед правой стороной формулы линейного изменения)	$y = a$ — закон не влияния принятой объясняющей переменной на показатель, который имеет собственную предысторию значений
$y = ax^b$ — закон показательного роста (закон показательной гибели $y = ax^{-b}$ не является устойчивым из-за бесконечности показателя при нулевом значении объясняющей переменной)	$y = a \exp(\pm cx)$ — закон Лапласа в математике (Ципфа в биологии, Парето в экономике, Мандельброта в физике) экспоненциального роста или гибели, относительно которого Лаплас создал методологию операторного исчисления
$y = ax^b \exp(-cx)$ — биотехнический закон в упрощенной форме (П.М. Мазуркин), когда показательный рост постепенно получает экспоненциальное торможение	$y = a \exp(\pm cx^d)$ — закон экспоненциального роста или гибели в полной форме (конструкции), который имеет интенсивность, не равную единице (П.М. Мазуркин)
$y = ax^b \exp(-cx^d)$ — биотехнический закон, общий для шести конструктов (П.М. Мазуркин)	

В частном случае, когда $a_{2i} = 0$, волновая модель (1) после редукции получается в виде двухчленной формулы тренда (тенденции):

$$y = a \exp -bx^c + dx^e \exp(-fx^g), \quad (2)$$

где y — показатель; x — переменная; $a - g$ — параметры (2). Первый член является модифицированным законом экспоненциальной гибели, второй — биотехническим законом.

После выявления закономерностей всех пар «фактор – скорость» по значениям коэффициентов корреляции выполняется ранжирование формул по убыванию адекватности. Выбор первого в рейтинге уравнения проводится по наибольшему коэффициенту корреляции. Тогда факторы ранжируют по их значимости по мере уменьшения коэффициента корреляции.

Для построения многофакторной модели аналогично предыдущим расчетам составляется уравнение, и производится расчет наиболее значимого фактора. Полученная зависимость записывается, а в полученные остатки как переменная ставится второй по значимости параметр и т. д. Таким образом просчитываются все показатели, участвующие в моделировании. Получаемое адаптивное уравнение будет являться многофакторной моделью. Все расчеты проводятся с использованием программной среды CurveExpert-1.40.

Результаты исследования. С использованием программной среды CurveExpert-1.40 по каждому фактору получены однофакторные зависимости с коэффициентами корреляции. Наибольшее значение по оценке коэффициента корреляции получено у фактора X19 («тип покрытия»). В соответствии с методикой производим

расчет, начиная в общем аддитивном уравнении именно с фактора X19, затем в остатки от X19 как переменная ставится параметр X20 (второй по значимости) и т. д. Таким образом, учтены в последующих членах многофакторного уравнения все составляющие в рейтинге переменные.

После моделирования многофакторной модели снова был выполнен рейтинг по убыванию коэффициента корреляции y членов многофакторной модели. В табл. 3 представлен рейтинг по убыванию коэффициента корреляции, выполненный с учетом волновых составляющих многофакторной модели.

Общая математическая многофакторная модель приведена в табл. 3, и она будет состоять из полученных зависимостей как составляющих:

$$y = \sum_{i=1}^m y_i, \quad (3)$$

где y — показатель (зависимый фактор); i — номер составляющей многофакторной зависимости; m — количество переменных, в нашем случае равное 31.

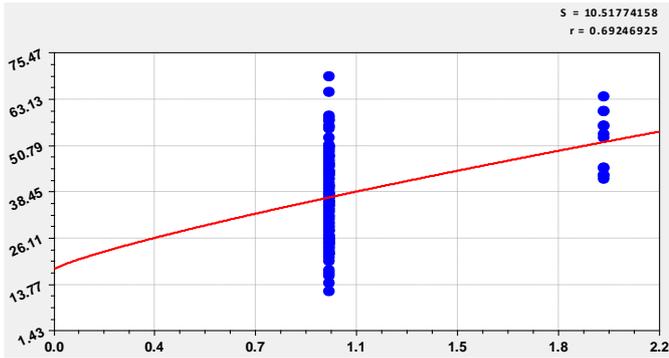
Однако номера составляющих в табл. 3 не совпадают с номерами факторов в табл. 1 из-за рейтинга соподчиненных составляющих многофакторной модели по убыванию коэффициента корреляции. В табл. 3 каждая составляющая приведена как смесь тренда и волновой закономерности. Тогда произвольное перечисление превращается в иерархическую структуру.

На рис. 3 и 4 приведены примеры графиков первых нескольких формул.

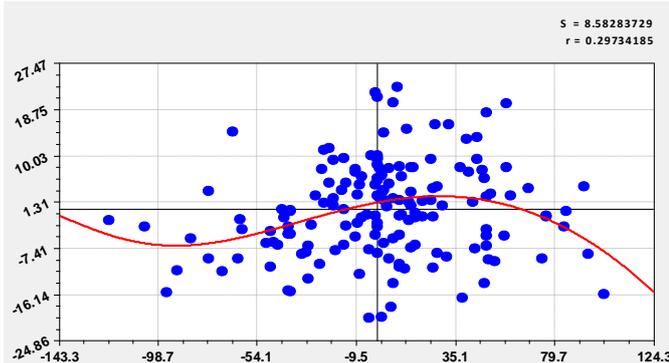
Таблица 3. Рейтинг факторов по коэффициенту корреляции и зависимости, описывающие многофакторную модель

Переменная	Зависимость	Коэффициент корреляции
X19 (тип покрытия)	$y_1 = 17,84651 \exp 0,03519x_{19} + 18,52405x_{19}^{0,81854} \exp(-0,0010323x_{19}^{1,00037})$	0,6925
X23 (уклон, ‰)	$y_2 = -0,0026217 \exp 4,65285 x_{23} + 150^{0,14875} + 5,03192 \cdot 10^{-6}$	0,2973

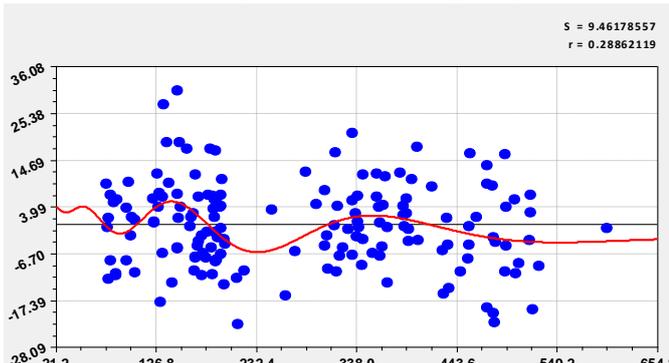
Переменная	Зависимость	Коэффициент корреляции
	$x_{23} + 150 \cdot 4,60963 \exp(-0,84974 x_{23} + 150 \cdot 0,42114)$	
X6 (высота, м)	$y_3 = 425,148 - 414,541x_6^{0,004983} + 0,0018245x_6^{1,86189}$ $\exp -0,0091816x_6 \cos(\pi x_6 \cdot 0,87332 + 0,31472x_6^{0,79891} + 12,00933)$	0,2886
X9 (время в пути, ч)	$y_4 = 9365,854 - 9363,346x_9^{1,87646 \cdot 10^{-4}} + 6,50714 \cdot 10^{-42}x_9^{35,01506}$ $\exp -0,17256x_9^{1,42353} \cos(\pi x_9 \cdot 29,34908 - 2,21377x_9^{0,53208} + 2,51825)$	0,2816
X4 (широта)	$y_5 = -1,12476 + 1,81555x_4 - 8,26773x_4^{2,11391} \cos(\pi x_4 \cdot 0,1408 - 1,63776)$	0,253
X30 (горизонтальная видимость, км)	$y_6 = -621,5462 \exp -7,8128 \cdot 10^{-4}x_{30}^{3,0025}$ $+ 129,5215x_{30}^{1,71052} \exp(-0,11632x_{30}^{1,44165})$	0,242
X20 (ширина дорожно-го покрытия, м)	$y_7 = 0,017762 \exp 2,24213x_{20}^{0,43187} - 1,57835$ $\cdot 10^{-50}x_{20}^{131,7503} \exp(-19,98251x_{20}^{1,00048})$	0,2409
X27 (атмосферное давление, мм.рт.ст.)	$y_8 = -4246,585 \exp 0,002061x_{27}^{0,99973} + 0,83564x_{27}^{1,51851} \exp(3,5639$ $\cdot 10^{-5}x_{27}^{0,98288})$	0,2191
X14 (мощность двигателя, л.с.)	$y_9 = -8,29244 \cdot 10^{-9} \exp 0,13534x_{14}^{0,85883} + 2,05345 \cdot 10^{-57}x_{14}^{22,54183}$	0,2149
X25 (вид снежно-ледяного покрытия)	$y_{10} = -0,066705 + 0,89752x_{25} + 3,00593x_{25}^2 \exp(-0,67266x_{25}) \cos(\pi x_{25})$	0,2074
X26 (температура воздуха, °C)	$y_{11} = 0,33819 \exp 0,034561 x_{26} + 40 - 5,86822$ $\cdot 10^{-86} x_{26} + 40 \cdot 57,03397 \exp(-0,011272 x_{26} + 40 \cdot 1,97531)$	0,199
X31 (количество осадков за 12 ч, мм)	$y_{12} = 0,0015595 \exp 2,50589x_{31}^{0,98652} - 3,29175 \cdot 10^{-8}x_{31}^{14,31385}$	0,1944
X17 (нагруженность)	$y_{13} = 1,41902 \exp 0,58006x_{17} - 106,7264x_{17}^{12,19745} \exp(-2,71843x_{17})$	0,1776
X13 (время эксплуатации лесовоза, лет)	$y_{14} = -3,96922 \cdot 10^{-24} \exp 50,79412x_{13}^{0,057445} + 4,50805$ $\cdot 10^{-10}x_{13}^{41,40499} \exp(-8,31873x_{13}^{1,00619})$	0,1557
X3 (номер часа в сутках)	$y_{15} = 1,69326 \cdot 10^{-24} \exp 53,01777x_3^{0,02546}$ $- 1490,823x_3^{14,16707} \exp(-20,41105x_3^{0,27971})$	0,1462
X28 (относительная влажность, %)	$y_{16} = -407,4248 \exp 0,0047339x_{28}^{0,75157} + 329,9335x_{28}^{0,077596}$	0,1461
X21 (время эксплуатации дороги, лет)	$y_{17} = 0,79273 - 4,33501 \cdot 10^{-5}x_{21}^{3,14603}$	0,1264
X24 (влажность дорожного покрытия)	$y_{18} = 0,48606 \exp 1,00592x_{24} - 4,26947$ $\cdot 10^7x_{24}^{7,68554} \exp(-19,15676x_{24}^{0,18913})$	0,1258
X15 (пробег лесовоза, тыс. км)	$y_{19} = 9491,308 - 9487,283x_{15}^{1,12875 \cdot 10^{-4}}$	0,125
X11 (грузоподъемность, т)	$y_{20} = -2,80526 \exp -6,0846 \cdot 10^{-4}x_{11}^{2,15727} + 1,42067$ $\cdot 10^{-31}x_{11}^{26,8328} \exp(-0,10651x_{11}^{1,5034})$	0,1098
X16 (время с капремонта лесовоза, мес.)	$y_{21} = 9,99437 \cdot 10^{-6} \exp 1,31611x_{16}^{1,02137} - 4,7499 \cdot 10^{-16}x_{16}^{16,38144}$	0,1011
X1 (номер месяца в году)	$y_{22} = 1,51622 - 0,28462x_1$	0,0812
X7 (стаж работы водителя, лет)	$y_{23} = 0,37231 \exp 2,62632 \cdot 10^{-4}x_7^{2,66042} - 8,30413 \cdot 10^{-7}x_7^{4,59433}$	0,0807
X12 (тип кузова)	$y_{24} = 0,077855 \exp 1,2673x_{12} - 0,013183x_{12}^{5,14326}$	0,0488
X8 (возраст водителя, лет)	$y_{25} = 2,44849 \exp -3,48411 \cdot 10^{-5}x_8^{2,00903} - 0,57444x_8^{0,39165}$	0,0481
X5 (долгота)	$y_{26} = -0,73764 + 0,24169x_5$	0,0461
X18 (тип шин)	$y_{27} = -0,097734 + 0,48445x_{18}$	0,0356
X2 (номер суток в месяце)	$y_{28} = -0,078542 \exp 0,043805x_2^{0,98303} + 7,45229 \cdot 10^{-9}x_2^{4,67365}$	0,0298
X29 (скорость ветра, м/с)	$y_{29} = 0,1941 - 0,10287x_{29}$	0,0223
X10 (колесная формула)	$y_{30} = -0,15237 + 0,31147x_{10}$	0,022
X22 (количество капремонтов, шт)	$y_{31} = -0,059591 \exp -0,68289x_{22} + 1,68756 \cdot 10^{-4}x_{22}^{7,61797}$	0,0158



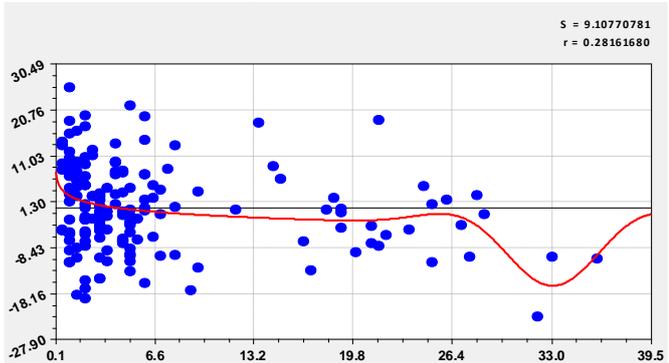
Изменение скорости лесовоза от параметра X19



Изменение скорости лесовоза от параметра X23



Изменение скорости лесовоза от параметра X6



Изменение скорости лесовоза от параметра X9

Рис. 3. Графики зависимостей факторов, влияющих на скорость движения (в правом верхнем углу: S — стандартное отклонение; r — коэффициент корреляции)

Обсуждение результатов. Факторный анализ показателей, влияющих на скорость движения автолесовоза, выявил, что наибольшее их количество входит в первую десятку по значимости. Это факторы, характери-

зующие дорожные условия. Полученные результаты согласуются с исследованиями других авторских коллективов.

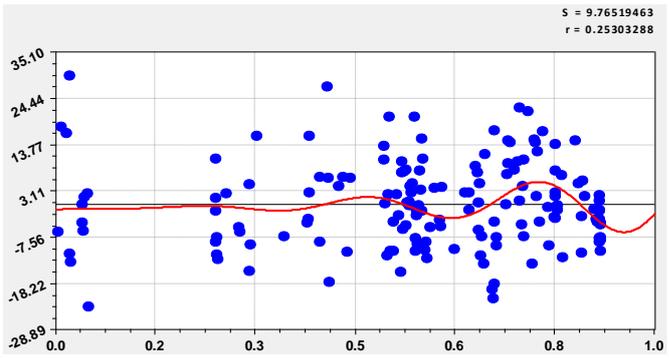


Рис. 4. График изменения скорости лесовоза от параметра X4

Распределение относительной ошибки всего многофакторного уравнения представлено в табл. 4.

Таблица 4. Распределение относительной ошибки многофакторного уравнения

70	50	40	30	20	10	0	-10	-20
1	1	2	6	6	30	37	29	15
-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-130
9	10	8	2	1	1	2	1	1

Данное распределение соответствует биотехническому закону [20] по зависимости:

$$y = 1,40732 \cdot 10^{-130} (x+150)^{69,40058} \exp(-0,017365(x+150)^{1,56948}) + 1. \quad (4)$$

Коэффициент корреляции при этом равен 0,9530, что соответствует сверхсильной факторной связи, когда уровень адекватности выше 0,95.

График распределения относительной ошибки многофакторного уравнения с моделью биотехнического закона представлен на графике (рис. 5).

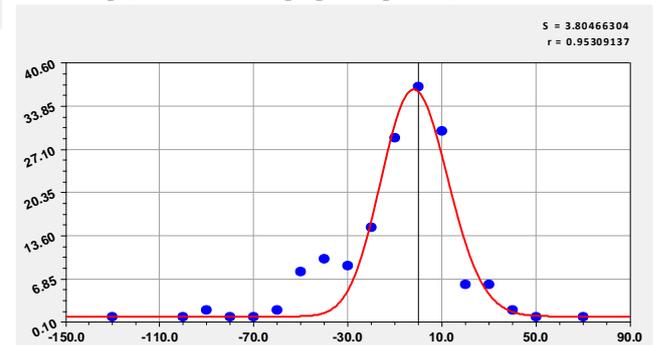


Рис. 5. График распределения относительной ошибки многофакторного уравнения с моделью биотехнического закона

Формула (4) отличается от закона Гаусса тем, что в распределении относительной погрешности наблюдается сильная асимметричность. Можно определить, какие точки и с каким набором значений 31 параметра резко отклоняются от норматива погрешности $\pm 30\%$ для экологических и технологических исследований.

Количество таких отклоняющихся от 30% точек равно 30 шт. (табл. 4). Тогда репрезентативность стати-

стической выборки по табл. 1 равна $100 \times (162-30) / 162 = 81.48 \%$. Эти 30 точек нужно проверить на правильность их параметризации.

После исключения аномальных опытов можно повторно провести идентификацию формул (1) и (2). После таких процедур можно приступать к расчетам.

В программной среде Excel по уточненным уравнениям из табл. 3 с учетом всех значащих цифр из распечатки CurveExpert-1.40 можно рассчитать чистое время в пути по маршруту от точки А до точки Б по выделенным участкам.

Заключение. В результате проведенных исследований выявлены закономерности влияния 31 фактора на скорость движения лесовоза. Затем выбраны наиболее значимые факторы по коэффициенту корреляции, влияющие на скорость движения лесовоза при вывозке древесины с лесосеки.

В результате была предложена многофакторная модель, характеризующая общую зависимость скорости движения лесовозов от анализируемых факторов. Фак-

торный анализ параметров, влияющих на показатель в виде скорости движения лесовозов с грузом и без него, позволил выявить, что наибольшее влияние оказывают факторы, характеризующие дорожные условия. По общей модели можно рассчитать чистое время, необходимое на доставку древесины по маршруту.

Исследование выполнено в рамках проекта «Разработка фундаментальных основ проектирования лесной инфраструктуры как динамически изменяемой системы в условиях деятельности лесозаготовительного производства» № 19-410-240005, поддержанного за счет средств целевого финансирования, предоставленного РФФИ, правительством и краевым Фондом науки Красноярского края, а также в рамках научного проекта «Исследование и моделирование процессов развития экономики лесной промышленности региона в контексте природно-климатических условий и ресурсного потенциала» № 18-410-240003.

Литература

- Grigorev I.V., Khitrov E.G., Kalistratov A.V., Stepanishcheva M.V. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences. Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems. 16–26 June 2014, Albena, Bulgaria, V. 2. p. 339–344.
- Mokhirev A., Ryabova T., Pozdnyakova M. Comprehensive evaluation of technological measures for increasing availability of wood resources // Journal of Applied Engineering Science. 2018. № 16 (4). P. 565–569.
- Henningsson M., Karlsson J., Rönnqvist M. Optimization models for forest road upgrade planning // Journal of Mathematical Models and Algorithms. 2007. № 6 (1). P. 3–23.
- Tromborg E. Economic and environmental impacts of transport cost changes on timber and forest product markets in Norway // Scandinavian Journal of Forest Research. 2009. № 24 (4). P. 354–366.
- Lan C., Menendez M. Truck speed profile models for critical length of grade. J. Transp. Eng. 2003, 129 (4). P. 408–419. JTRPEDI, 0733-947X. URL: 10.1061/(ASCE)0733-947X (20 03)129:4(408)
- Мохирев А.П., Рукомойников К.П., Герасимова М.М., Медведев С.О. Исследование зависимости скорости движения автолесовозов от природно-климатических факторов // Успехи современного естествознания. 2020. № 8. С. 18–25.
- Sun X., He Y., Wang S., Wang Y. Characteristics of operating speed for proper speed limit // ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable - Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals. 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals – Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable, ICCTP 2010. sponsors: North Am. Chin. Overs. Transp. Assoc. (NACOTA), Beijing University of Technology, Transportation and Development Institute of ASCE, Transp. Res. Board Comm. Transp. Dev. Ctries: in the collection. National Natural Science Foundation of China. Beijing, 2010. P. 1678–1689.
- Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Пладов А.В. Моделирование движения лесовозных автопоездов на ПВЭМ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 234 с.
- Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Баклагин В.Н. Анализ и расчет параметров движения лесовозных автопоездов // торный анализ параметров, влияющих на показатель в виде скорости движения лесовозов с грузом и без него, позволил выявить, что наибольшее влияние оказывают факторы, характеризующие дорожные условия. По общей модели можно рассчитать чистое время, необходимое на доставку древесины по маршруту.
- Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2010. № 8. С. 140–143.
- Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В., Дорохин С.В. Влияние условий движения на скоростные режимы транспортных потоков при вывозке древесины // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 4. С. 153.
- Сивков Е.Н., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В. Условия движения по лесовозным дорогам // Разработка научных основ и практических рекомендаций по переводу лесосырьевой базы Республики Коми на инновационную интенсивную модель расширенного воспроизводства на 2015–2020 гг.: сб. материалов науч.-практической конф. по научной теме ин-та (29–30 нояб. 2016 г.); отв. ред. Е.В. Хохлова. Сыктывкар, 2017. С. 19–23.
- Коваленко Т.В., Коточигов М.В. Использование климатической информации для организации транспортного освоения лесных массивов // Технология и оборудование лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. Вып. 6. С. 104–108.
- Mazurkin P.M. Method of identification. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM. 2014. Book 6. V. 1. P. 427–434. URL: 10.5593/SGEM2014/B61/S25.059
- Zverev G.I., Menshikh V.V. Optimizing the selection of combination of alternative functions of ergatic system multifunctional elements // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 012062.
- Velazquez-Marti B., Annevelink E. GIS application to define biomass collection points as sources for linear programming delivery networks // Transactionsofthe ASABE. 2009. № 52 (4). P. 1069–1078.
- Мазуркин П.М. Экономико-статистическое моделирование. Йошкар-Ола: Поволжский ГТУ, 2016. 276 с.
- Мазуркин П.М. Статистическая идентификация рядов динамики // Вестн. мировой науки. Сер. Экономика. 2016. № 1. С. 79–96.
- Мазуркин П.М., Евдокимова О.Ю. Факторный анализ и динамика загрязнения речной воды. Йошкар-Ола: Поволжский ГТУ, 2012. 42 с.
- Мазуркин П.М., Сафин Р.Г., Просвирников Д.Б. Статистическое моделирование процессов деревообработки. Казань: КНИТУ, 2014. 290 с.
- Мазуркин П.М. Биотехнический закон и виды факторных связей // Успехи современного естествознания. 2009. № 9. С. 152–156.

References

1. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Kalistratov A.V., Stepanishcheva M.V. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences. Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems. 16–26 June 2014, Albena, Bulgaria, V. 2. P. 339–344.
2. Mokhirev A., Ryabova T., Pozdnyakova M. Comprehensive evaluation of technological measures for increasing availability of wood resources // Journal of Applied Engineering Science. 2018. № 16 (4). P. 565–569.
3. Henningsson M., Karlsson J., Rönnqvist M. Optimization models for forest road upgrade planning // Journal of Mathematical Models and Algorithms. 2007. № 6 (1). P. 3–23.
4. Tromborg E. Economic and environmental impacts of transport cost changes on timber and forest product markets in Norway // Scandinavian Journal of Forest Research. 2009. № 24 (4). P. 354–366.
5. Lan C., Menendez M. Truck speed profile models for critical length of grade. J. Transp. Eng. 2003, 129 (4). P. 408–419. JTPEDI, 0733-947X. URL: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:4(408)
6. Mohirev A.P., Rukomojnikov K.P., Gerasimova M.M., Medvedev S.O. Investigation of the dependence of the speed of logging trucks on natural and climatic factors // Advances in current natural sciences. 2020. № 8. P. 18–25.
7. Sun X., He Y., Wang S., Wang Y. Characteristics of operating speed for proper speed limit // ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable – Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals. 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals – Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable, ICCTP 2010. sponsors: North Am. Chin. Overs. Transp. Assoc. (NACOTA), Beijing University of Technology, Transportation and Development Institute of ASCE, Transp. Res. Board Comm. Transp. Dev. Ctries: in the collection. National Natural Science Foundation of China. Beijing, 2010. P. 1678–1689.
8. SHegel'man I.R., Skrypnik V.I., Pladov A.V. Modeling the movement of logging road trains on the PVEM. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2003. 234 p.
9. Skrypnik V.I., Kuznecov A.V., Baklagin V.N. Analysis and calculation of parameters of movement of timber road trains // Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU. 2010. № 8. P. 140–143.
10. Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., Skvorcova T.V., Dorohin S.V. Influence of traffic conditions on high-speed modes of transport flows during wood removal // Modern High Technologies. 2014. № 4. P. 153.
11. Sivkov E.N., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V. Traffic conditions on logging roads // Razrabotka nauchnyh osnov i prakticheskikh rekomendacij po perevodu lesosyr'evoy bazy Respubliki Komi na innovacionnyuyu intensivnyuyu model' rasshirennogo vosproizvodstva na 2015–2020 g.: sb. materialov nauch.-prakticheskoy konf. po nauchnoj teme in-ta (29–30 noyab. 2016 g.); otv. red. E.V. Hohlova. Syktyvkar, 2017. P. 19–23.
12. Kovalenko T.V., Kotochigov M.V. Use of climate information for the organization of transport development of woodlands // Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennogo kompleksa: sb. nauch. tr. SPb.: SPbGLTU, 2013. Vyp. 6. P. 104–108.
13. Mazurkin P.M. Method of identification. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM. 2014. Book 6. V. 1. P. 427–434. URL: 10.5593/SGEM2014/B61/S25.059
14. Zverev G.I., Menshikh V.V. Optimizing the selection of combination of alternative functions of ergatic system multifunctional elements // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 012062.
15. Velazquez-Marti B., Annevelink E. GIS application to define biomass collection points as sources for linear programming gofdelivery networks // Transactionsofthe ASABE. 2009. № 52 (4). P. 1069–1078.
16. Mazurkin P.M. Economic and statistical modeling. Joshkar-Ola: Povolzhskij GTU, 2016. 276 p.
17. Mazurkin P.M. Statistical identification of dynamics series // Vestn. mirovoj nauki. Ser. Ekonomika. 2016. № 1. P. 79–96.
18. Mazurkin P.M., Evdokimova O.YU. Factor analysis and dynamics of river water pollution. Joshkar-Ola: Povolzhskij GTU, 2012. 42 p.
19. Mazurkin P.M., Safin R.G., Prosvirnikov D.B. Statistical modeling of woodworking processes. Kazan': KNITU, 2014. 290 p.
20. Mazurkin P.M. Biotechnical law and types of factor relations // Advances in current natural sciences. 2009. № 9. P. 152–156.