

УДК 550.4:504

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
НА СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ АВТОЛЕСОВОЗОВ****<sup>1</sup>Мохирев А.П., <sup>2</sup>Рукомойников К.П., <sup>1</sup>Герасимова М.М.,  
<sup>1</sup>Медведев С.О., <sup>2</sup>Царев Е.М., <sup>2</sup>Анисимов С.Е.**<sup>1</sup>*Лесосибирский филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки  
и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Лесосибирск, e-mail: ale-mokhirev@yandex.ru;*<sup>2</sup>*ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет,  
Йошкар-Ола, e-mail: rukomojnikovkp@volgatech.net*

На пропускную способность транспортных путей, по которым происходит вывозка заготовленной древесины, влияет большое количество природно-климатических и производственных факторов. Одним из параметров, позволяющим проанализировать указанную зависимость, является скорость движения автолеса-воза, которая может использоваться в качестве критерия оптимальности при оптимизации лесотранспортных процессов. В данной статье представлено исследование влияния на этот показатель природно-климатических факторов при движении на различных категориях лесных дорог в порожнем и грузовом направлениях в различные периоды года. Объектом исследования являются автомобильные лесовозные дороги, находящиеся в интенсивно используемых лесозаготовительных районах Красноярского края. Исследования строились на базе натурных наблюдений и анализа результатов транспортировки древесины. Для получения регрессионных зависимостей получен план эксперимента. В результате статистической обработки результатов наблюдений в системе Statistica найдены регрессионные уравнения, описывающие влияние величины уклона дороги, количества осадков, времени суток, типа дороги и направления движения на скорость автолеса-воза. Указанные зависимости получены для различных периодов года. Все уравнения имеют достаточно высокую точность и являются статистически значимыми. Получены и проанализированы графики зависимостей скорости движения автолеса-воза от уклона дороги и количества осадков для движения в зимний, весенний и летний периоды. Полученные результаты могут быть использованы в имитационном моделировании технологического процесса вывозки древесины с лесосеки на нижний склад лесозаготовительных предприятий Красноярского края. В приведенном исследовании также предложен ряд новых подходов к оценке скорости лесовозных дорог.

**Ключевые слова:** скорость автолеса-воза, величина уклона, количество осадков, регрессионная зависимость, тип дороги, направление движения

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF NATURAL AND CLIMATIC FACTORS  
ON THE LOGGING TRUCKS SPEED****<sup>1</sup>Mokhirev A.P., <sup>2</sup>Rukomoynikov K.P., <sup>1</sup>Gerasimova M.M.,  
<sup>1</sup>Medvedev S.O., <sup>2</sup>Tsarev E.M., <sup>2</sup>Anisimov S.E.**<sup>1</sup>*Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Lesosibirsk, Krasnoyarsk region, e-mail: ale-mokhirev@yandex.ru;*<sup>2</sup>*Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: rukomojnikovkp@volgatech.net*

A large number of natural-climatic and production factors affect the capacity of transport routes used for the removal of harvested wood. One of the parameters that allow us to analyze this dependence is the speed of a logging truck, which can be used as an optimality criterion for optimizing forest transport processes. This article presents a study of the influence of natural and climatic factors on this indicator when driving on different categories of forest roads in the empty and cargo directions in different periods of the year. The object of research is automobile logging roads located in intensively used logging areas of the Krasnoyarsk territory. The studies were based on field observations and analysis of the results of wood transportation. To obtain regression dependences, a plan of the experiment is received. As a result of statistical processing of the results of the observations in the Statistica system, regression equations were found that describe the influence of the road slope, amount of precipitation, time of day, road type, and direction of movement on the speed of a logging truck. The indicated dependencies were obtained for different periods of the year. All equations have fairly high accuracy and are statistically significant. Graphs of the dependence of the logging truck speed on the slope of the road and the amount of precipitation for traffic in winter, spring and summer are obtained and analyzed. The results obtained can be used in simulation modeling of the technological process of wood removal from the cutting area to the lower warehouse of logging enterprises in the Krasnoyarsk territory. The study also suggests a number of new approaches to assessing the speed of logging roads.

**Keywords:** logging truck speed, slope value, amount of precipitation, regression dependence, road type, movement direction

Транспортно-технологические процессы в лесозаготовительном производстве в большой степени зависят от природно-климатических условий местности. Неблагоприятные условия приводят к снижению

производительности технологических машин и увеличению себестоимости производства. Важной характеристикой технологического процесса транспортировки древесины является пропускная способность лесовозных

дорог. Изменение производственных и природно-климатических факторов приводит к существенным колебаниям этого показателя в течение суток, лесозаготовительного периода и года [1, 2].

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.

Чем выше категория дороги, интенсивность и скорость движения, тем меньшее влияние оказывают природно-климатические факторы на режим движения. Наибольшее влияние из них имеют время суток, осадки и уклон транспортного пути. При этом они отличаются на различных категориях лесовозных дорог (магистраль, ветка, ус) в разное время года.

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 [3–6] 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 [7, 8] 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.

В работе [9] приведены математические зависимости, описывающие влияние климатических факторов на скорость разных групп лесовозов. Однако в данном исследовании не отражена зависимость от такого фактора, как уклон дороги, который оказывает значительное влияние на указанный показатель.

Целью данного исследования является нахождение зависимости скорости движения автолесовозов от указанных природно-климатических факторов при движении на различных категориях лесовозных дорог (магистраль, ветка, ус) в разное время года.

#### Материалы и методы исследования

Объектом исследования выступили автомобильные лесовозные дороги, находящиеся на интенсивно используемых лесозаготовительных районах Красноярского края (Енисейский, Мотыгинский). 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. Анализировались сведения о природно-климатических факторах за аналогичные периоды времени, находящиеся в архивных сведениях о погоде по соответствующим метеорологическим постам (Енисейский, Мотыгинский).

Местоположение анализируемых путей в Мотыгинском лесничестве представлено на рис. 1. На рисунке пути показаны цветными линиями: синий – магистраль; красный – ветка; желтый – ус. Уклон фиксационной точки анализируемого маршрута определялся в программе GoogleEarthPro (рис. 2).

В связи с неоднородностью природно-климатических и производственных условий в различные временные интервалы, а также возможностью их классификации

по наиболее близким характеристикам, весь лесозаготовительный процесс разделен на 3 сезона [10]: зимний – круглосуточно отрицательная температура окружающей среды (11 ноября – 20 марта); весенний – днем положительная температура окружающей среды, а ночью отрицательная (21 марта – 20 апреля); летний – круглосуточно положительная температура окружающей среды (21 апреля – 10 ноября).

Кроме климатических факторов на скорость вывозки влияют и производственные. Наиболее значимые – тип автомобильной дороги (магистраль, ветка, ус) и направление движения (грузовое, порожнее).

Исследования проводились при прочих равных условиях: участок без поворотов более 300 м, анализируемый уклон  $\pm 20$  более 300 м. При этом достигается равномерная скорость без влияния данных факторов.

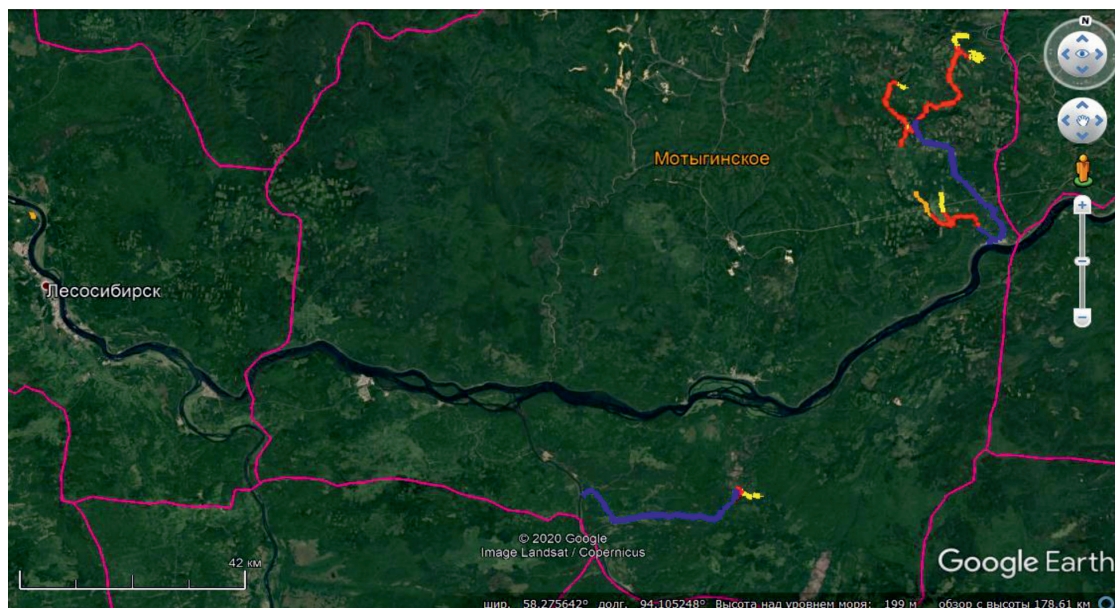


Рис. 1. Местоположение анализируемых путей в Мотыгинском лесничестве

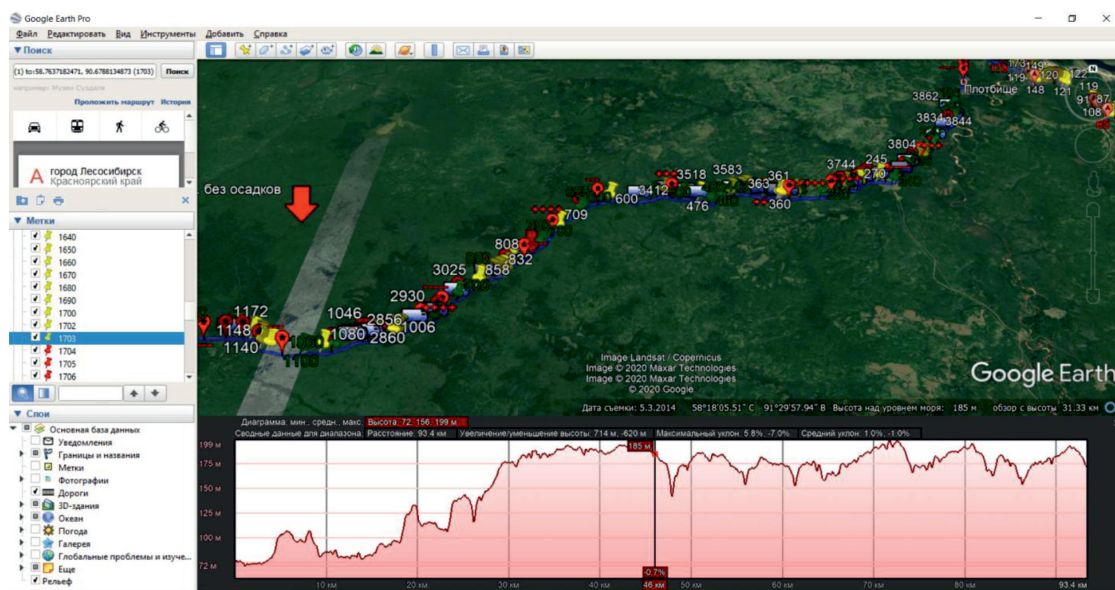


Рис. 2. Профиль рельефа всего маршрута



Значения для эксперимента фиксировались при следующих температурных режимах: в зимний период при отрицательных температурах в дневное и ночное время, в зимне-весенний период при отрицательных температурах ночью и положительных температурах днем, в летнее время при положительных температурах в дневное и ночное время.

Для проведения эксперимента собрана информация, полученная из следующих ресурсов: сводный отчет перемещения (положения) автолеса по маршруту его движения, сгенерированный из ГЛОНАСС источника в табличный редактор Microsoft Excel; Google карты; программа GoogleEarthPro; архив метеоданных в Красноярском крае.

Для сбора данных проведен пассивный эксперимент, в котором при различных условиях фиксировалась скорость движения автолеса. Для построения плана эксперимента рассматривались следующие значения факторов:

1.  $x_1$  – время суток: светлое время суток, от рассвета до заката солнца (0); темное время суток, от заката до рассвета солнца (1).

2.  $x_2$  – направление движения: порожнее (0); грузовое (1).

3.  $x_3$  – тип дороги: магистраль (0); ветка (1); лесовозный ус (2).

4.  $x_4$  – величина уклона: уклон около 0; спуск при среднем уклоне  $5^\circ$ ; подъем при среднем уклоне  $5^\circ$ .

5.  $x_5$  – количество осадков, накопленных за последние 12 ч: 0 мм/12 ч (отсутствие осадков); 2 мм/12 ч; 4 мм/12 ч.

Экспериментальные исследования выполнялись на базе составленной в программе Statistica матрицы планирования полного факторного эксперимента [11]. Варьирование факторов осуществлялось в форме смешанного экспериментального плана типа  $2^2 \cdot 3^3$ . В частности, варьирование факторов, характеризующих время суток и направление движения, проводилось на двух уров-

нях, факторов, характеризующих тип дороги – на трех уровнях, факторов, влияющих на величину уклона и количество осадков, накопленных за последние 12 ч, также на трех уровнях.

Данные экспериментальных наблюдений формировались в таблице.

Количество наблюдений в каждой фиксационной точке варьировалось от 5 до 32. Статистическая обработка экспериментальных данных, полученных в соответствии с планом эксперимента, осуществлялась в программе Statistica. Моделирование осуществлялось методом наименьших квадратов, оценки параметров моделей регрессии определялись методом Левенберга–Марквардта.

### Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости строились для зимнего, весеннего, летнего периодов.

Для **зимнего** периода уравнение с наибольшим индексом детерминации  $R^2 = 0,92$ , которое наилучшим образом описывает исследуемую зависимость:

$$y = 49,1155 - 1,6389x_1 - 8,3685x_2 - 12,5271x_3 - 0,1663x_4^2 - 1,4240x_5 + 0,5094x_3x_5.$$

Для **весеннего** периода уравнение с наибольшим индексом детерминации  $R^2 = 0,93$ :

$$y = 46,6208 + 1,1711x_1x_3 - 7,2154x_2 + 5,2158x_3 + 0,3165x_4 - 1,253x_5 - 0,1945x_4^2 - 8,5023x_3^2.$$

Для **летнего** периода уравнение с наибольшим индексом детерминации  $R^2 = 0,79$ , которое наилучшим образом описывает исследуемую зависимость:

$$y = 47,7668 - 0,8283x_1x_4 - 3,6352x_2 - 10,6854x_3 - 0,1483x_4^2 - 1,6746x_5 + 0,0404x_5^2 - 0,1297x_3x_5.$$

Фрагмент таблицы наблюдений при эксперименте

№ опыта	Время суток	Направление движения	Тип дороги	Уклон, град	Количество осадков, мм/12 ч	Скорость движения, км/ч
1	светлое	порожнее	магистраль	0	0	52,7
2	темное	порожнее	магистраль	0	0	49,5
3	светлое	порожнее	магистраль	0	2	40,9
4	темное	порожнее	магистраль	0	2	37,8
...	...	...	...	...	...	...
108	темное	грузовое	ус	5	4	11,5

Параметры всех уравнений являются статистически значимыми на уровне значимости 0,05. Этот вывод сделан в результате проверки по  $t$ -критерию Стьюдента гипотезы об их статистической незначимости. Значения индекса детерминации  $R^2$  свидетельствуют о высокой точности полученных уравнений. Все регрессионные зависимости являются достоверными, что показала

проверка гипотезы об их статистической незначимости с помощью  $F$ -критерия Фишера при уровне значимости 0,05.

Зависимости скорости движения от наиболее значимых факторов: уклона дороги и количества осадков, выпавших за последние 12 часов, для движения в зимний период представлены на рис. 3, в весенний период – на рис. 4, в летний период – на рис. 5.

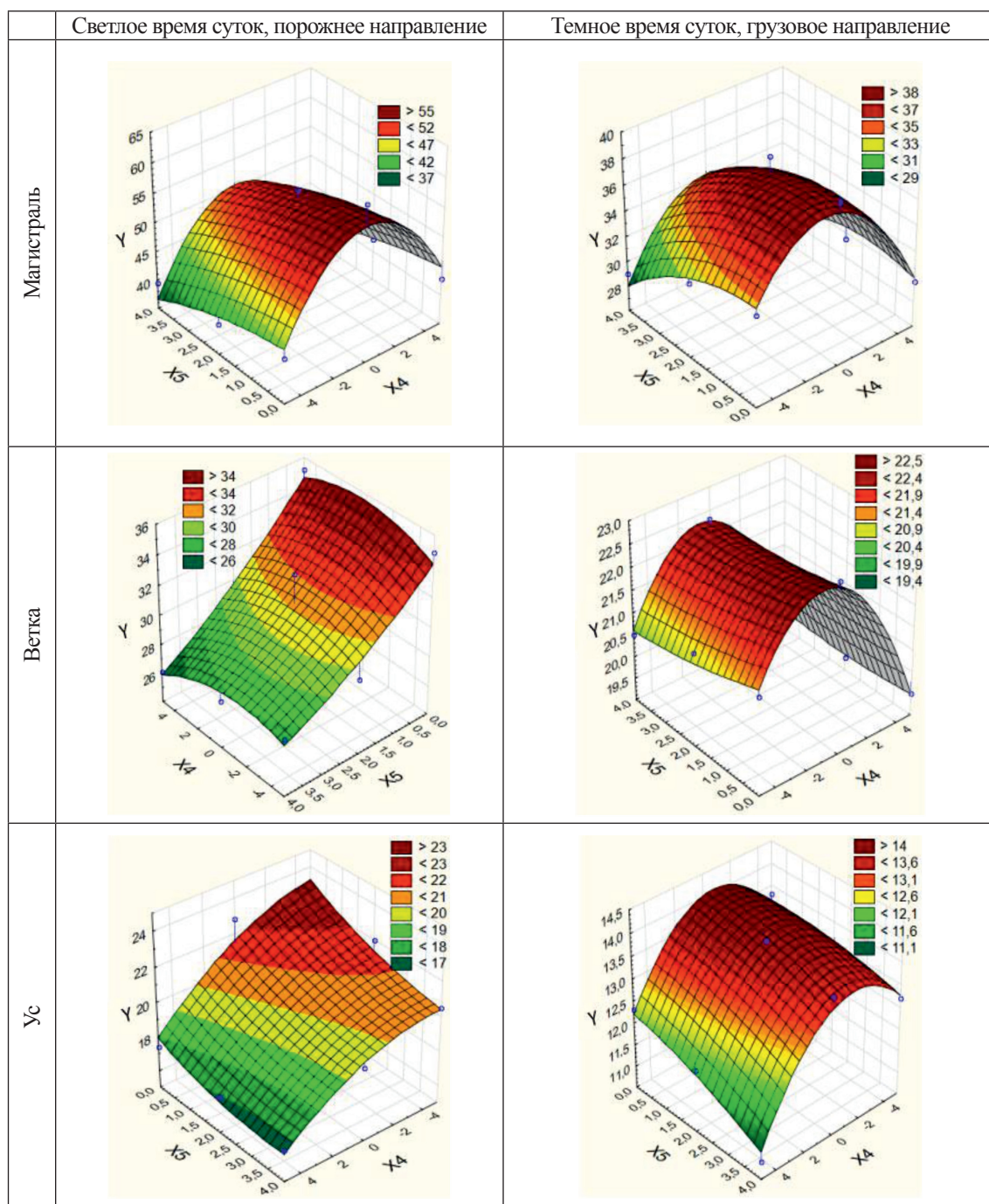


Рис. 3. Зависимости скорости движения от уклона дороги и количества осадков для движения в зимний период времени

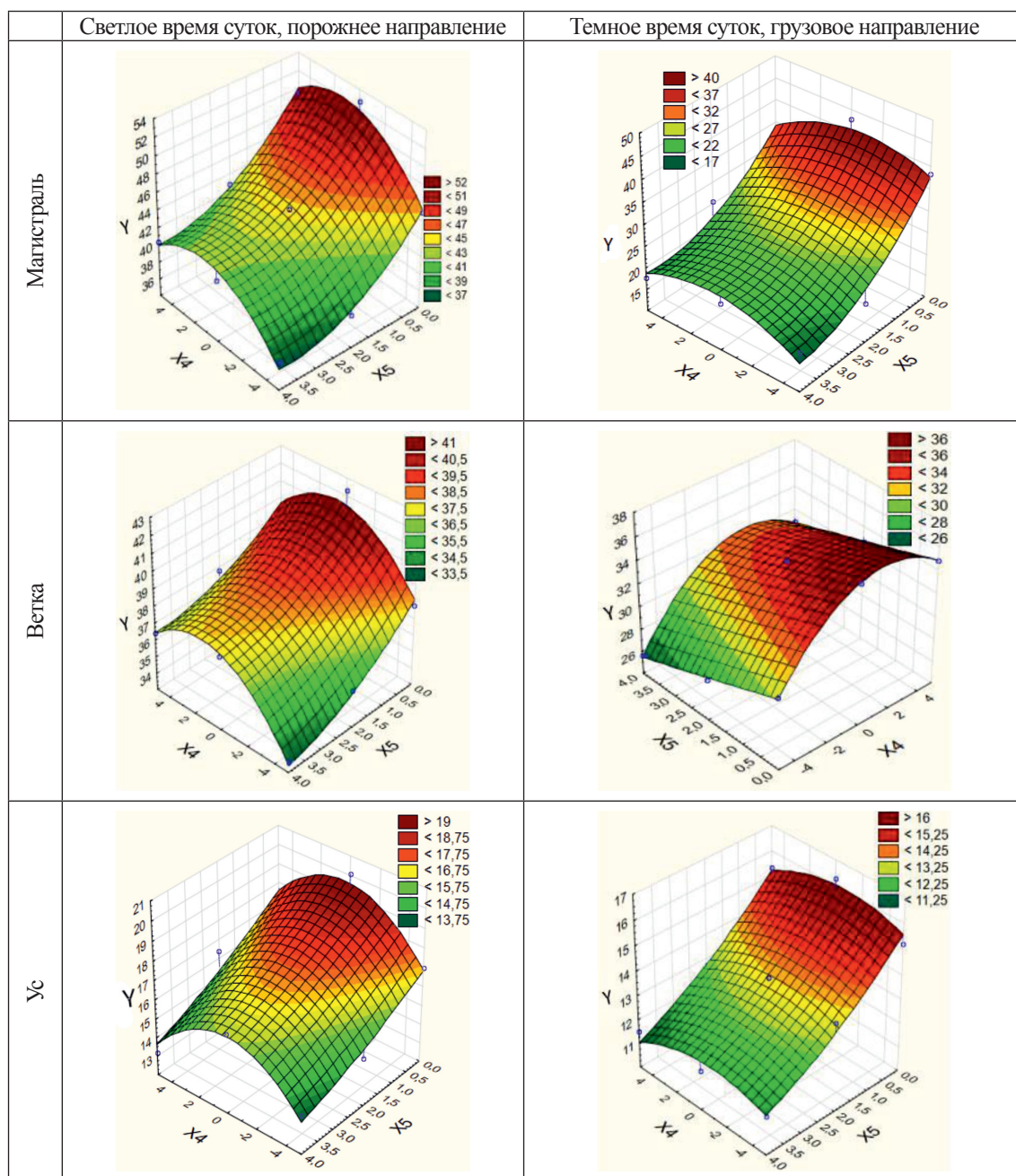


Рис. 4. Зависимости скорости движения от уклона дороги и количества осадков для движения в весенний период времени

Анализируя графики рис. 3–5, можно сделать выводы:

1. В зимний и весенний периоды максимальные скорости движения автомобиля на ровной дороге, кроме движения в зимний период на усе в светлое время суток в порожнем направлении. При подъеме или спуске скорость движения замедляется. Если при положительном уклоне (подъеме) это объясняется ограничением тяговых характеристик, то при спуске водитель замед-

ляет автомобиль намеренно для снижения риска возникновения аварийной ситуации на дороге со снежным или снежно-ледяным покрытием. В летнее время такие риски не возникают, поэтому снижение скорости автомобиля происходит при увеличении уклона дороги.

2. Увеличение количества осадков практически во всех вариантах снижает скорость движения. Однако причины и значимость на различных типах дорог различны.



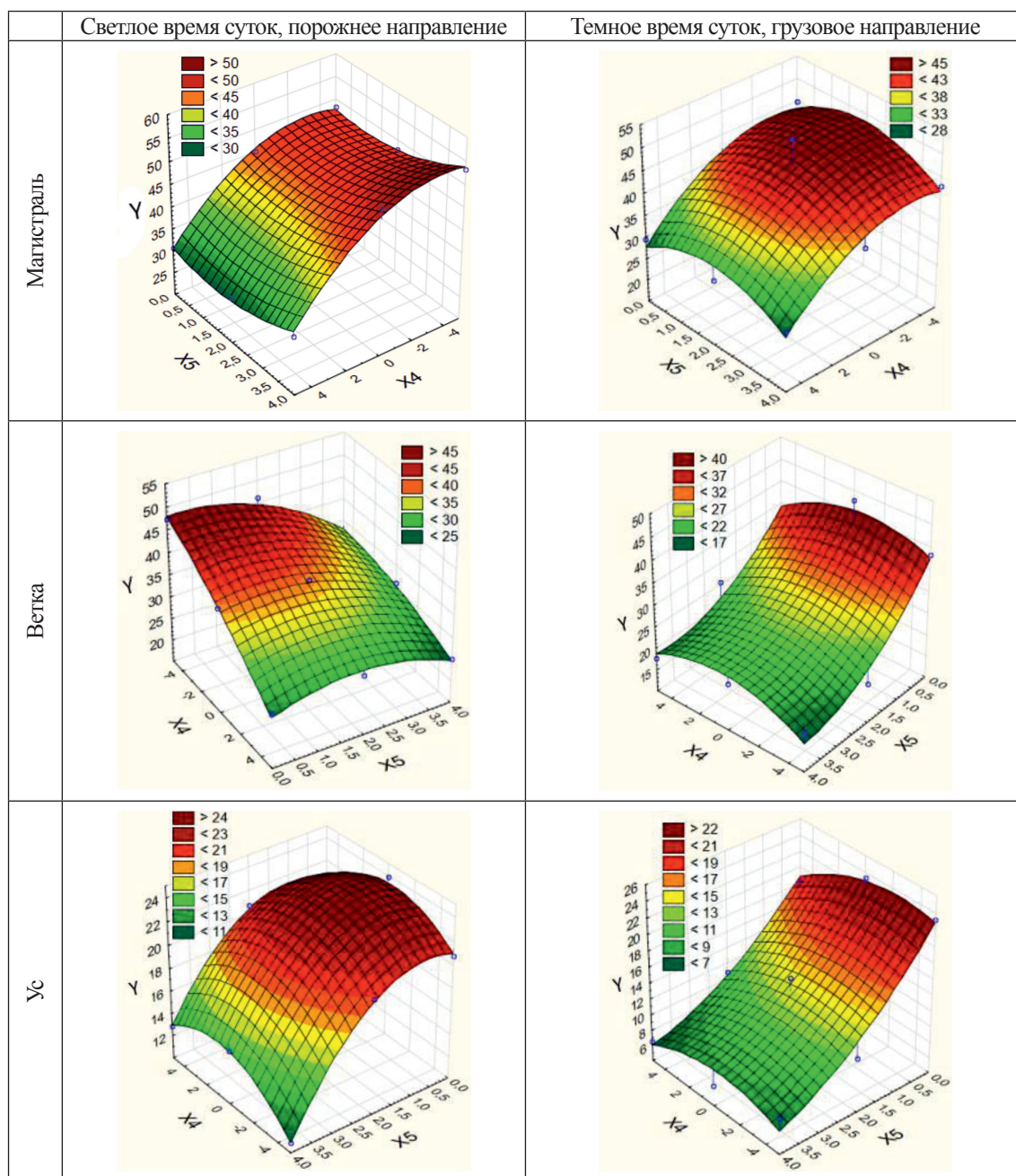


Рис. 5. Зависимости скорости движения от уклона дороги и количества осадков для движения в летний период времени

2.1. В зимнее время увеличение количества выпавшего снега увеличивает сопротивление движению автомобиля, что приводит к снижению скорости.

2.2. В порожнем направлении движения в весенний период при небольших осадках снег в дневное время успевает таять, насыщая дорогу водой, что приводит к снижению скорости. При большем количестве снега он укатывается автомобилями, при этом сглаживая неровности на повреж-

денной паводками дороге, и значительно на скорость не влияет.

2.3. Если в летнее время на дорогах с хорошим твердым покрытием влияние осадков практически не заметно, то на временных лесовозных дорогах оно значительно. Без дорожной одежды при воздействии осадков на дорогах снижается несущая способность, что приводит к сопротивлению качения колеса и, соответственно, снижению скорости.

## Заключение

Представленные материалы систематизируют накопленные к настоящему времени знания по исследуемым вопросам, а также предлагают ряд новых подходов к оценке скорости лесовозного транспорта в зависимости от различных природно-производственных условий. Полученные регрессионные модели позволили выявить закономерности влияния осадков, уклонов, освещенности, транспортной нагрузки на рейс и характеристик лесовозной дороги на скорости движения лесовозов. Они могут быть использованы при математическом моделировании технологического процесса вывозки древесины на лесопромышленные склады лесозаготовительных предприятий. Предложенный математический подход позволит оптимизировать технологический процесс работы лесовозного транспорта и проводить своевременную оценку экономической доступности лесных участков при освоении новых территорий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и ООО «Красресурс 24» в рамках научного проекта № 20-410-242901 и 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 Красноярского края и Краевым фондом науки.*

## Список литературы / References

1. Мохирев А.П., Медведев С.О., Смолина О.Н. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 3 (35). С. 103–113.
2. Mokhiev A.P., Medvedev S.O., Smolina O.N. Factors affecting the capacity of logging roads // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2019. T. 9. № 3 (35). P. 103–113 (in Russian).
3. Платонова Е.В. Обоснование пропускной способности лесовозных дорог при различных скоростных режимах и моделях транспортного потока: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2006. 151 с.
4. Platonova E.V. Justification of the capacity of logging roads at different speed modes and models of traffic flow: dis... kand. tekhn. nauk. Arhangelsk, 2006. 151 p. (in Russian).
5. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. 2019. No. 1177. P. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1177/1/012032.
6. Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Бакагин В.Н. Анализ и расчет параметров движения лесовозных автопоездов // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. 2010. № 8. С. 140–143.
7. Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V., Baklagin V.N. Analysis and calculation of parameters of movement of logging road trains // Trudy lesoinzhenernogo fakulteta PetrGU. 2010. № 8. P. 140–143 (in Russian).
8. Мохирев А.П., Позднякова М.О., Рукомойников К.П. Определение реальной величины пропускной способности пути на вывозке древесины в различных природно-производственных условиях // Успехи современного естествознания. 2020. № 7. С. 19–24.
9. Mokhiev A.P., Pozdnyakova M.O., Rukomoynikov K.P. Determination of the real value of the capacity of the road for wood removal in various natural and industrial conditions // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2020. № 7. P. 19–24. (in Russian).
10. Бурмистрова О.Н., Черников Э.А., Пильник Ю.Н., Чемшикова Ю.М. К вопросу совершенствования транспортных грузопотоков лесоматериалов в условиях интеллектуальных транспортных систем // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8. № 3 (31). С. 131–138. DOI: 10.12737/article\_5b97a15c4ef7d3.26143418.
11. Burmistrova O.N., Chernikov E.A., Pilnik Yu.N., Chemshikova Yu.M. On the issue of improving the transport cargo flows of timber in the conditions of intelligent transport systems // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2018. Vol. 8. No. 3 (31). P. 131–138. DOI: 10.12737/article\_5b97a15c4ef7d3.26143418 (in Russian).
12. 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.
13. Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., Skvortsova T.V., Dorokhin S.V. Influence of traffic conditions on the speed modes of traffic flows during wood removal // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. № 4. P. 153 (in Russian).
14. Сивков Е.Н., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В. Условия движения по лесовозным дорогам. Сборник Изучение лесосырьевой базы Республики Коми: научно-методический аспект. Сборник материалов научно-практической конференции по научной теме института «Разработка научных основ и практических рекомендаций по переводу лесосырьевой базы Республики Коми на инновационную интенсивную модель расширенного воспроизводства на 2015–2020 годы». 2017. С. 19–23.
15. Sivkov E.N., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V. Traffic conditions on logging roads. Sbornik Izuchenie lesosyrevoj bazy Respubliki Komі: nauchno-metodicheskij aspekt. Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferencii po nauchnoy teme instituta «Razrabotka nauchnyh osnov i prakticheskikh rekomendacij po perevodu lesosyrevoj bazy Respubliki Komі na innovacionnuyu intensivnuyu model' rasshirenno go vosproizvodstva na 2015–2020 gody». 2017. P. 19–23 (in Russian).
16. Коваленко Т.В., Коточигов М.В. Использование климатической информации для организации транспортного освоения лесных массивов // Технология и оборудование лесопромышленного комплекса: сборник научных трудов. Вып. 6. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. С. 104–108.
17. Kovalenko T.V., Kotochigov M.V. Use of climate information for the organization of transport development of woodlands // Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennogo kompleksa: sbornik nauchnyh trudov. Vyp. 6. SPb.: SPbGLTU, 2013. P. 104–108 (in Russian).
18. Мохирев А.П., Мохирев П.Ф. Исследование специфики лесозаготовок в Красноярском крае // Resources and Technology. 2015. Т. 12. № 2. С. 98–108.
19. Mokhiev A.P., Mokhiev P.F. Study of the specifics of logging in the Krasnoyarsk territory // Resources and Technology. 2015. T. 12. № 2. P. 98–108 (in Russian).
20. Мазуркин П.М. Статистическая идентификация рядов динамики // Вестник мировой науки. Серия «Экономика». 2016. № 1. С. 79–96. DOI: 10.18411/jos-2016-econ-1-05.
21. Mazurkin P.M. Statistical identification of time series // Vestnik mirovoj nauki. Seriya «Ekonomika». № 1. 2016. P. 79–96. DOI: 10.18411/jos-2016-econ-1-05 (in Russian).