

УДК 629.3

DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_109

EDN TLUHNZ

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПО ПОДВИЖНОСТИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО БЕЗДОРОЖЬЮ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАРТ ПОДВИЖНОСТИ

А.И. Марковнина

ORCID: 0009-0000-7971-0424 e-mail: alinomalino@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Предлагается метод оценки эффективности транспортно-технологических средств (ТТС) по подвижности как интегральному показателю. Проанализированы подходы к построению карт подвижности и предложен более точный метод визуализации результатов расчета показателя эффективности ТТС. По предлагаемой методике проведено сравнение шести ТТС различной конфигурации. Результаты визуализированы при помощи построения карты подвижности для участка топографической карты местности. По методике проведен анализ влияния конфигурационных параметров на показатель подвижности. Найден экстремум функции, при достижении которого целесообразно не вносить изменения в существующую конфигурацию, а проектировать новую. Определены зависимости эффективности от изменения технических характеристик ТТС.

Ключевые слова: подвижность; эффективность, проходимость; транспортно-технологические средства.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Марковнина, А.И. Методика оценки эффективности по подвижности колесных транспортно-технологических средств при движении по бездорожью с применением карт подвижности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 109-120. DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_109 EDN TLUHNZ.

METHODOLOGY FOR EFFICIENCY ASSESSMENT OF WHEELED TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLES IN OFF-ROAD MOVING BASED ON MOBILITY USING MOBILITY MAPS

A.I. Markovnina

ORCID: 0009-0000-7971-0424 e-mail: alinomalino@yandex.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper proposes a method for assessing the efficiency of transport and technological vehicles (TTV) based on mobility as an integral indicator. Approaches to constructing mobility maps are analyzed and a more accurate method for visualizing the results of calculating the TTV efficiency indicator is proposed. A comparison of six TTV of various configurations was carried out using the proposed methodology. The results are visualized by constructing a mobility map for a section of a topographic map of the area. The methodology was used to analyze the influence of configuration parameters on the mobility indicator. An extremum of the function has been found, upon reaching which it is advisable not to make changes to the existing configuration, but to design a new one. The dependence of efficiency on changes in TTV technical characteristics has been determined.

Key words: mobility; efficiency; cross-country ability; transport and technological vehicle.

FOR CITATION: Markovnina, A.I. Methodology for efficiency assessment of wheeled transport and technological vehicles in off-road moving based on mobility using mobility maps. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 109-120. DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_109 EDN TLUHNZ.

Колесные транспортно-технологические средства (ТТС), вездеходы, снегоболотоходы (СБХ), в том числе, колесные машины повышенной и высокой проходимости эксплуатируются в тяжелых дорожных условиях, по местности с грунтами с низкой несущей способностью для выполнения различных транспортно-технологических задач. Для эффективности движения на этапе проектирования целесообразно выбрать конфигурацию ТТС (технические и компоновочные характеристики). Оценка полного комплекса конфигурационных характеристик в рамках проектирования обеспечивает их рациональный выбор, что обуславливает актуальность настоящей работы.

Под эффективностью следует понимать отношение показателя выполненной работы к затратам на ее выполнение; эффективность по подвижности рассматривается как прогнозируемая скорость движения ТТС в определенных условиях. Для повышения эффективности ТТС необходимы: 1) совершенствование методов проектирования рациональных конфигурационных характеристик ТТС; 2) совершенствование методов планирования наиболее рационального по опасности и экономической целесообразности маршрута в зависимости от выполняемых транспортно-технологических задач; 3) адаптация конфигурационных характеристик ТТС к местности их эксплуатации. Интегральным показателем любой ТТС в условиях бездорожья является подвижность машины [1]. Данный показатель охватывает широкий спектр конфигурационных характеристик ТТС, учитывает характер взаимодействия ТТС с ландшафтом и роль человеческого фактора.

В настоящее время за рубежом активно изучаются методы построения карт подвижности местности для построения моделей движения различных ТТС. В картах подвижности отражаются ландшафтные условия движения (неделимый комплекс геоморфологических, почвогрунтовых и рельефных характеристик местности) и характеристика взаимодействия «машина-местность» (например, цветовое обозначение непроходимых участков). Отечественные исследования в этой области рассматривают вопрос подвижности не так широко, как за рубежом. Предлагаемая методика оценки эффективности по подвижности колесных ТТС может быть использована на всех этапах как конструирования, так и эксплуатации ТТС. Принципиально важно исследование процессов взаимодействия колесных ТТС, предназначенных для выполнения различных транспортно-технологических операций, в том числе, в условиях бездорожья.

Анализ данного направления исследований показал, что в настоящее время довольно глубоко проработаны вопросы, связанные с взаимодействием колесных ТТС с местностью. Получены зависимости, позволяющие оценивать подвижность колесных ТТС и их эффективность. В области изучения вопросов оценки эффективности колесных ТТС и комплексов фундаментальными работами являются труды В.Ф. Бабкова, Г.Б. Безбородовой, Я.И. Бронштейна, Н.А. Бухарина, Е.Б. Волковой, В.И. Гребенщикова, В. Диксона, Д.В. Зезюлина, Ю. Мацкерле, В.Ф. Платонова, M.G. Bekker, J.Y. Wong и многих других [2-7]. Исследованиями в области подвижности и конкурентоспособности занимались В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, В. Горелов, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, Г.О. Котиев, В.И. Котляренко, В.В. Ларин, В.С. Макаров, В.Н. Наумов, Е.В. Сарач, Н.В. Чернышев, В.В. Чобиток и другие [8-12]. В области исследований проходимости колесных машин можно выделить: Я.С. Агейкина, А.С. Антонова, В.Ф. Бабкова, Е.Е. Баженова, Л.В. Барахтанова, В.В. Белякова, В.Н. Кравца, В.Е. Колотилина, Г.О. Котиева, В.С. Макарова, С.Е. Манянина, В.Н. Наумова, А.В. Папунина, С.В. Рукавишникова, В.А. Скотникова и др. [13-18]. Среди зарубежных ученых можно выделить: M.G. Bekker, K. Popp, J.Y. Wong, James P Hambleton и др. [19]. Параметры микропрофиля различных видов дорог и его влияние на колебательные процессы ТТС рассмотрены в работах Д.А. Антонова, В.Л. Афанасьева, Л.В. Барахтанова, Е.Б. Волковой, В.И. Ершова, С.В. Рукавишникова, А.А. Хачатурова, В.А. Шапкина. Методики оценки влияния геометрических особенностей рельефа на движение колесных ТТС рассматривались в исследованиях советских ученых: П.В. Аксенова, Н.А. Бухарина, А.И. Гришкевича, Д.М. Ломако, Д.А. Попова, А.А. Силаева и других. Исследованием и созданием карт

подвижности в настоящее время активно занимаются Jean M. Dasch, Paramsothy Jayakumar (США), Filip Dohna [20], Marian Rybansky (Чехия) и др.

Однако зависимости эффективности относительно условий подвижности ТТС уделялось достаточно мало внимания, а существующие методы оценки эффективности ТТС основываются на одном показателе, например, только на расходе топлива или только на затратах мощности. В результате в современных методах оценки эффективности проектируемых или модернизируемых ТТС не учитываются все их конфигурационные характеристики в целом. Их широкий спектр охватывается интегральным показателем подвижности, рассматриваемым в настоящей работе.

В широком смысле под эффективностью следует понимать степень соответствия машины ожидаемым требованиям потребителей. Подвижность – это интегральное эксплуатационное свойство ТТС, определяющее ее способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самих ТТС, т.е. возможность ТТС противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи. Проходимость – способность ТТС двигаться в любых эксплуатационных условиях безопасно и эффективно.

Критерием эффективности является отношение технической оценки ТТС к показателю его подвижности. При этом показатель подвижности рассчитывается как многокритериальная функция от технических характеристик машины, оценки территории и оценки режима движения. В общем виде показатель подвижности определяется следующим образом:

$$\Pi = \lambda_m \pm \lambda_t \pm \lambda_p, \quad (1)$$

где: λ_m – техническая оценка ТТС, λ_t – эксплуатационная оценка территории, λ_p – оценка режима движения. Знак \pm означает, что в определенных условиях характеристики территории и адекватность выбора режима движения могут как повысить показатель подвижности, так и понизить.

Эффективность по подвижности означает, насколько быстро колесное ТТС сможет преодолеть рассматриваемый участок и рассчитывается как отношение значения показателя подвижности к значению технической оценки машины:

$$\Pi_3 = \frac{\Pi}{\lambda_m}, \quad (2)$$

где: Π_3 – оценка эффективности по подвижности, λ_m – техническая оценка колесного ТТС, Π – показатель подвижности колесного ТТС.

Техническая оценка ТТС рассчитывается по формуле полезности – способность некоторой конфигурации ТТС удовлетворять одну или несколько потребностей, в данном случае – потребность максимально адаптироваться к изменяющимся условиям движения и рассчитывается следующим образом:

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n Q_i \times w_i, \quad (3)$$

где n – количество учитываемых технических характеристик, Q_i – оценка частного критерия, w_i – весовой коэффициент важности частного критерия (при этом $\sum w_i = 1$).

Весовой коэффициент важности частного критерия определяется методом экспертных оценок, методом попарного сравнения критериев, как наиболее информативным. Критерии оценки группируются в зависимости от специфики (массовые, габаритные и прочие) или от назначения расчета (влияющие преимущественно на скорость, влияющие преимущественно на грузоподъемность и др.).

За показатель территории λ_t принимается оценка непроходимости территории выбранным ТТСиК. Формула полной вероятности примет вид:

$$\lambda_t = P(A) = P(H_1) \cdot P(A/H_1) + P(H_2) \cdot P(A/H_2) + P(H_3) \cdot P(A/H_3), \quad (4)$$

где: $P(H_1)$, $P(H_2)$, $P(H_3)$ – вероятность проезда по препятствию с хорошим грунтом, проезда по ровному участку с любым грунтом, проезда по препятствию с плохим грунтом соответственно; $P(A/H_1)$ – вероятность остановки ТТС из-за геометрических особенностей территории и машины; $P(A/H_2)$ – вероятность остановки ТТС из-за особенностей сцеплений шин с опорой; $P(A/H_3)$ – вероятность остановки ТТС при совместном влиянии геометрических и сцепных особенностей территории.

Для адекватного выбора режима движения ТТС в условиях бездорожья расчет оценки режима движения проводится по формуле полезности:

$$\lambda_p = w_{устр} \times Q_{устр} + w_B \times Q_B \quad (5)$$

$$w_{устр} + w_B = 1,$$

где $w_{устр}$ – весовой коэффициент влияния установленных на ТТС дополнительных устройств повышения проходимости, $Q_{устр}$ – оценка влияния установленных на ТТС дополнительных устройств повышения проходимости, w_B – весовой коэффициент влияния выбора водителя, Q_B – оценка влияния выбора водителя.

Для визуализации рассчитанных показателей подвижности и эффективности по подвижности подойдет метод построения карт подвижности. Карты подвижности – это разбитая на участки с примерно однородными условиями движения карта местности, на которую нанесены отметки, соответствующие уровню подвижности на каждом таком участке для отдельно взятой машины. В зарубежных работах представлены два основных метода построения карт: 1 – распределение участков по модели NATO Reference Mobility Model (NRMM) по методу «GO – SLOW GO – NO GO» (рис. 1.а); 2 – цветовое обозначение вертикальных препятствий по модели Digital Terrain Model of the Czech Republic of the 5th generation (DMR 5G), непроходимых углов рельефа (рис. 1.б).

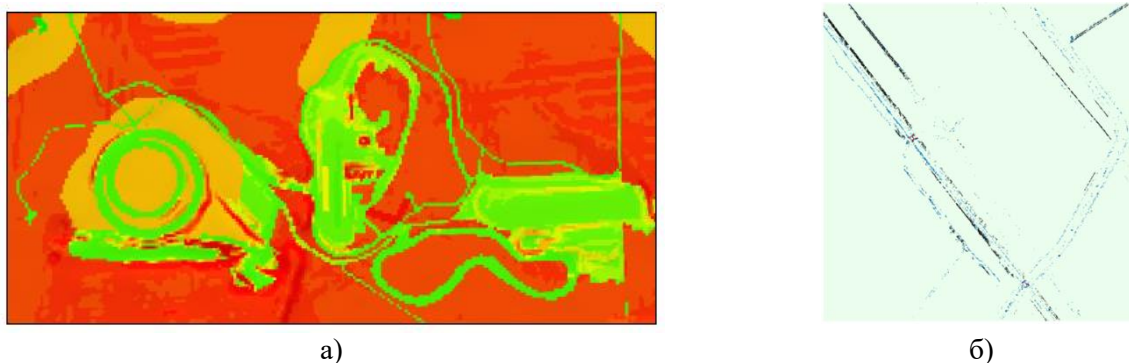


Рис. 1. Карта подвижности:

а) NRMM, б) DMR 5G

Fig. 1. Mobility map:

а) NRMM, б) DMR 5G

Предлагается построение карты подвижности, на которой разными цветами обозначается, проедет ли ТТС по участку местности и с какой прогнозируемой скоростью. Методика расчета подвижности представлена на рис. 2. По ней был произведен расчет для следующих моделей колесных ТТС: «Ункор» модель ТТС 39101, РУСАК К-8, «Алдан» модель ЗТМ 3941, «Бурлак» 6х6, «Байкал» модель ЗТМ 30081-10, «Вея» ЗВМ-39083 4х4 (табл. 1, рис. 3). Расчетная местность представлена фрагментом топографической карты. Характеристики водителя были выбраны близкими к тем, которые будут соответствовать водителю, проводящему экспериментальные исследования.

Для расчетов технические характеристики ТТС были распределены по группам: 1) показатели массы, 2) геометрические показатели, 3) показатели двигателя, 4) показатели движителя, 5) колесная формула. По формуле (3) были получены значения технической оценки ТТС (рис. 2), которую также можно назвать эффективной подвижностью, т.е. по-

движностью колесной машины в эталонных условиях. Максимальным уровнем подвижности обладают восьмиколесные Алдан и Русак, за счет высокой грузоподъемности и мощности двигателя. Расчет проводится для ТТС в снаряженном состоянии, величина дорожного просвета учитывается, исходя из начальных технических характеристик.

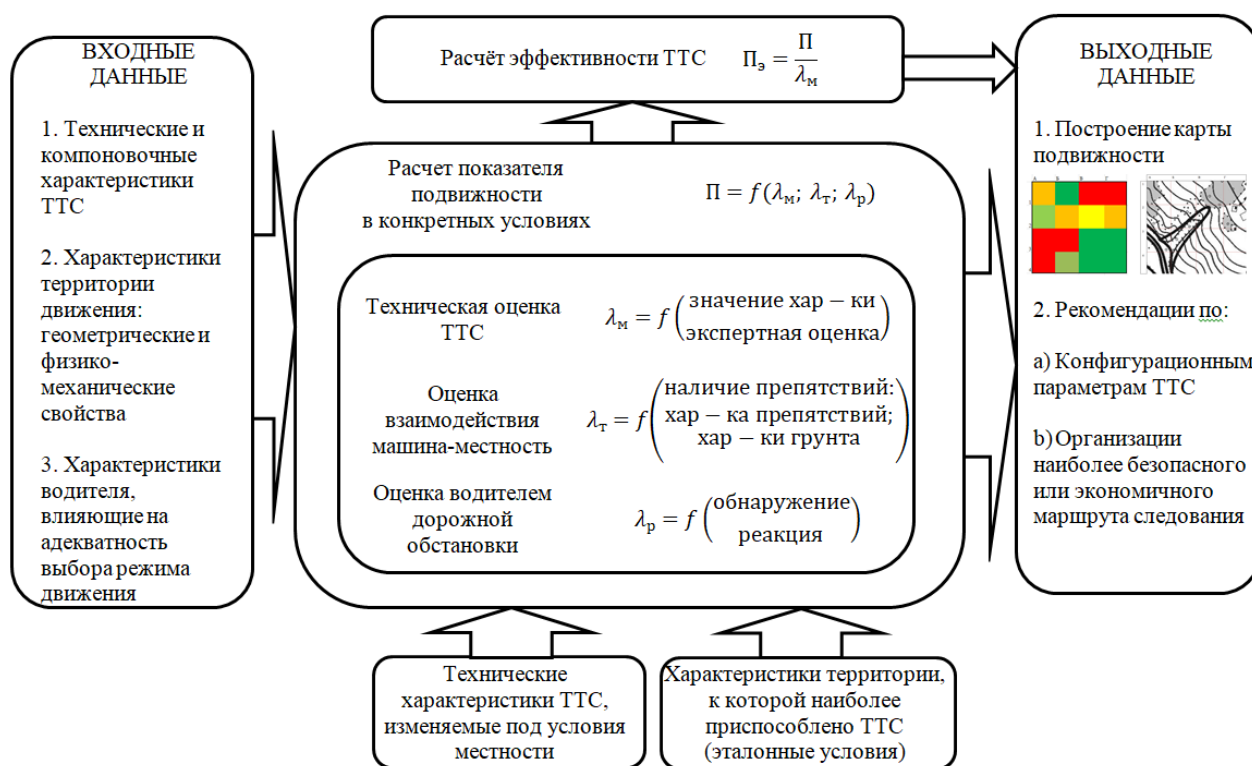


Рис. 2. Обобщенная методика расчета показателя подвижности с точки зрения проходимости колесных ТТС

Fig. 2. A generalized methodology for calculating the mobility indicator in terms of the cross-country ability of wheeled TTV

Таблица 1. Сравнимые ТТС

Table 1. Compared TTV

РУСАК К-8	«Алдан» модель ЗТМ 3941	«Бурлак» 6x6	«Байкал» модель ЗТМ 30081-10	Вея ЗВМ-39083 4x4	«Ункор» модель ТТС 39101

Для расчетов взята топографическая карта местности (рис. 4) с различными препятствиями: лес, здания, овраг. Карта условно разделена на 16 квадратов 15x15 м для детального расчета и построения карты подвижности для каждого ТТС. Для участков территории характерны: А1, А2, В1, Г1, Г2 – участки с лесом; А3, А4 – участки с водными препятствиями; А3, А4, Б2, Б3 – участки с обрывами; Б2, В2 – овраг; Г2, Г3 – строения; на остальных участках нет ярко выраженных препятствий.

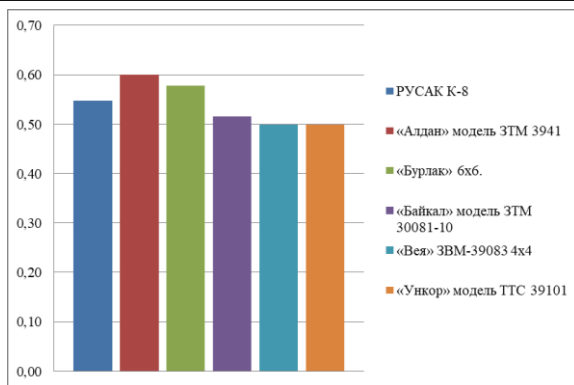


Рис. 3. Техническая оценка ТТС (эффективная подвижность)

Fig. 3. TTV technical assessment (effective mobility)

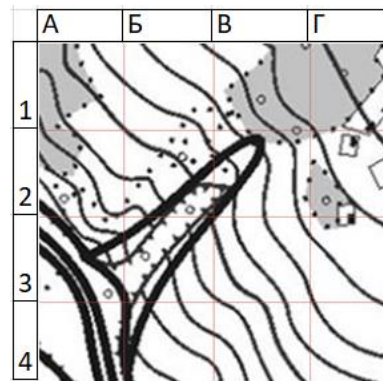


Рис. 4. Топографическая карта территории

Fig. 4. Topographic map of the territory

Оценка эффективности выбранного режима движения непосредственно зависит от водителя, которому необходимо верно оценить ситуацию при движении. Для теоретического расчета выбрано, что за рулем находится водитель в возрасте 35 лет, опыт вождения не менее 5 лет по бездорожью. Допускается, что движение происходит при хорошей погоде, в теплое время года, видимость снижена преимущественно препятствиями на местности (рельеф и растительность). Допускается, что движение происходит при хорошей погоде, в теплое время года, видимость снижена преимущественно препятствиями на местности (рельеф и растительность). По формуле (1) рассчитан показатель подвижности Π для выбранных ТТС, на участках А3 и В3 частично, на А4, В1, Г1 все ТТС достигают уровня критической потери подвижности. Это обусловлено наличием дискретных препятствий, расположенных недалеко друг от друга или большим и резким перепадом высот, т.е. обрывом. По формуле (2) рассчитана эффективность по подвижности, т.е. отношение показателя подвижности на территории к эффективной подвижности. В сравнении выделяются участки А4, В1, Г1, так как все ТТС на данных участках полностью теряли подвижность, показатель $\Pi_{\text{э}}$ меньше 0. На участках А1, В3 и Г2 $\Pi_{\text{э}}$ меньше 0 только у Ункора и Веи, на участках с подобными характеристиками их использование нерационально. На участках Б1, В3, В4, Г3 и Г4 показатель $\Pi_{\text{э}}$ больше 1, что означает, что ТТС может двигаться с максимально возможной скоростью.

Построение карты подвижности основывается на сравнении эффективной и фактической подвижностей. Если есть запас по подвижности, когда $\Pi_{\text{э}} > 1$, участок окрашен темно-зеленым цветом, если эффективность по подвижности меньше 1, но больше 0.75, участок светло-зеленый, если меньше 0.75, но больше 0.25, участок желтый, если меньше 0.25 и больше 0, участок оранжевый, если показатель меньше 0, участок красный. Результаты приведены на рис. 5. Для участков с лесными массивами характерно, что наибольшей подвижностью обладают маленькие колесные ТТС с высокой маневренностью. Ровные участки без профильных препятствий также хорошо проходят небольшие легкие ТТСиК, у которых изначально высокая максимальная техническая скорость движения и небольшая максимальная масса. Участки с труднопроходимым рельефом преодолеваются только крупными восьми- или шести колесными ТТС. Участки с обрывами или сплошными лесными массивами считаются непреодолимыми. Проезд по ним может осуществиться только после анализа ситуации водителем «здесь и сейчас» (если будет принято решение не объехать кусты и молодые деревья, а разрушить их) и с использованием дополнительных средств повышения проходимости. По аналогии рассчитана и представлена карта подвижности для колесного ТТС «Байкал» модель ЗТМ 30081-10 (рис. 6).

По методике проведен анализ влияния конфигурационных параметров на показатель подвижности. Выделено три группы характеристик: 1) габаритные характеристики (длина и ширина); 2) характеристики двигателя и движителя (1 – мощность, крутящий момент, 2 –

диаметр и ширина колес, 3 – высота протектора); 3) смешанные характеристики (масса, высота, дорожный просвет, радиус поворота). В расчете учитывался тот же фрагмент местности. Показатели технической оценки и эффективности движения посчитаны в среднем для рассматриваемого фрагмента. Участки, считавшиеся непроходимыми для исходной конфигурации ТТС, остались на 96 % непроходимыми для всех модификаций, рассчитанных ниже. Результаты расчетов технической оценки и изменения параметра эффективности представлены на рис. 7-12.

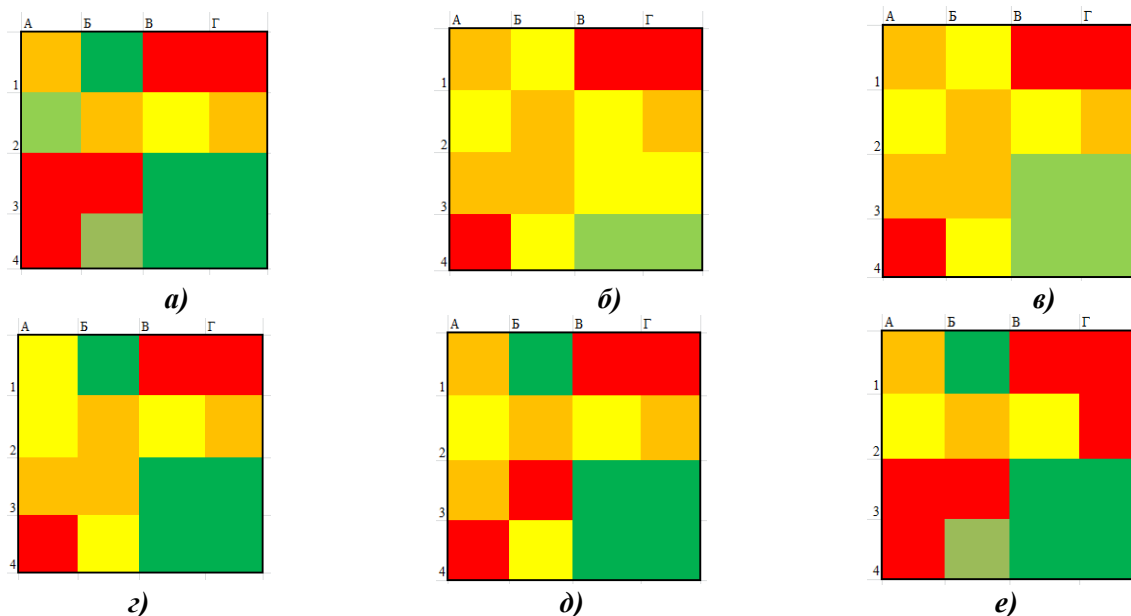


Рис. 5. Карты подвижности для ТТС:

a) «Ункор» модель ТТС 39101; б) РУСАК К-8; в) «Алдан» модель ЗТМ 3941; г) «Бурлак» 6х6; д) «Байкал» модель ЗТМ 30081-10; е) Вейа ЗВМ-39083 4х4

Fig. 5. Mobility maps for TTV:

a) Unkor model TTS 39101; б) RUSAK K-8; в) Aldan model ZTM 3941; г) Burlak 6x6; д) Baikal model ZTM 30081-10; е) Veya ZVM-39083 4x4

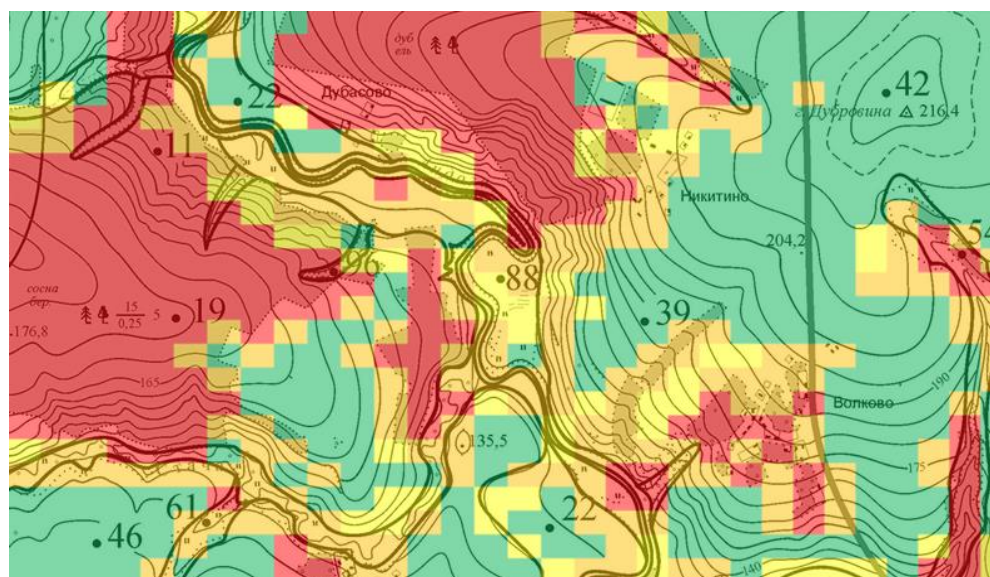


Рис. 6. Карта подвижности «Байкал» модель ЗТМ 30081-10 (объединенная с топографической)

Fig. 6. Mobility map for Baikal model ZTM 30081-10 (combined with topographic)

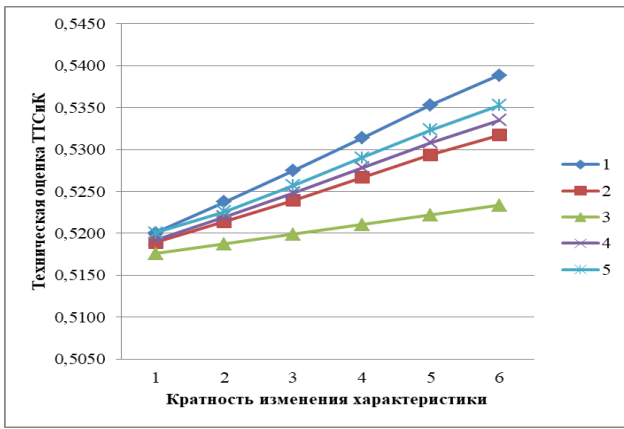


Рис. 7. Зависимость технической оценки ТТС λ_m от изменения длины и ширины:
 1 – на 4 и 4 % соответственно;
 2 – на 0 и 4 % соответственно;
 3 – на 4 и 0 % соответственно;
 4 – на 1 и 4 % соответственно;
 5 – на 4 и 1 % соответственно

Fig. 7. Dependence of the TTV technical assessment λ_m on the change in length and width:
 1 – by 4 % and 4 % respectively;
 2 – by 0 % and 4 % respectively;
 3 – by 4 % and 0 % respectively;
 4 – by 1 % and 4 % respectively;
 5 – by 4 % and 1 % respectively

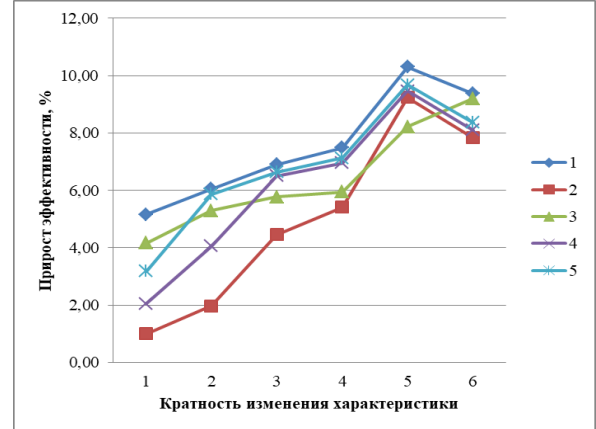


Рис. 8. Зависимость эффективности ТТС от изменения длины и ширины:
 1 – на 4 % и 4 % соответственно;
 2 – на 0 % и 4 % соответственно;
 3 – на 4 % и 0 % соответственно;
 4 – на 1 и 4 % соответственно;
 5 – на 4 % и 1 % соответственно

Fig. 8. Dependence of the TTV efficiency on the change in length and width:
 1 – by 4 % and 4 % respectively;
 2 – by 0 % and 4 % respectively;
 3 – by 4 % and 0 % respectively;
 4 – by 1 % and 4 % respectively;
 5 – by 4 % and 1 % respectively

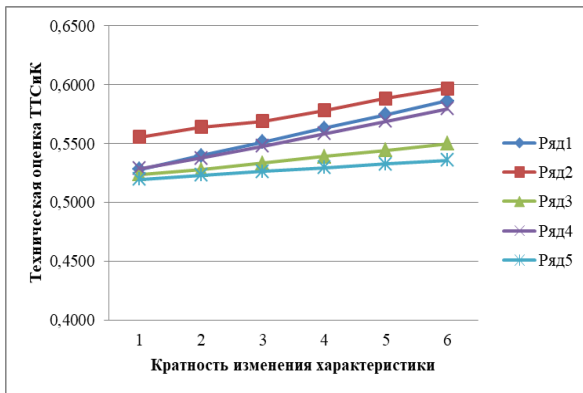


Рис. 9. Зависимость технической оценки ТТС λ_m от изменения параметров двигателя и движителя:
 1 – на 4 %, 2 % и 1 % соответственно;
 2 – на 2 %, 2 % и 2 % соответственно;
 3 – на 4 %, 0 % и 0 % соответственно;
 4 – на 0 %, 4 % и 0 % соответственно;
 5 – на 0 %, 0 % и 1 % соответственно

Fig. 9. Dependence of the TTV technical assessment λ_m on the change in the parameters of the engine and propulsor:
 1 – by 4 %, 2 % and 1 % respectively;
 2 – by 2 %, 2 % and 2 % respectively;
 3 – by 4 %, 0 % and 0 % respectively;
 4 – by 0 %, 4 % and 0 % respectively;
 5 – by 0 %, 0 % and 1 % respectively

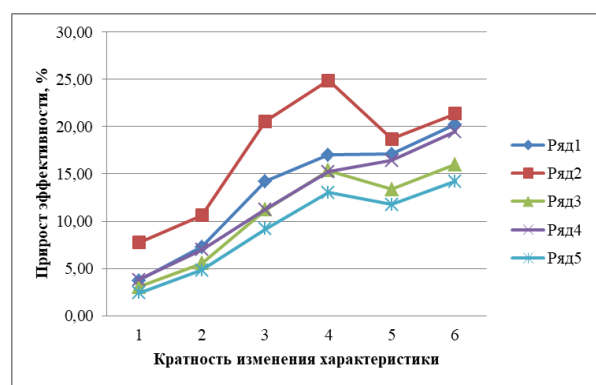


Рис. 10. Зависимость эффективности ТТС от изменения параметров двигателя и движителя:
 1 – на 4 %, 2 % и 1 % соответственно;
 2 – на 2 %, 2 % и 2 % соответственно;
 3 – на 4 %, 0 % и 0 % соответственно;
 4 – на 0 %, 4 % и 0 % соответственно;
 5 – на 0 %, 0 % и 1 % соответственно

Fig. 10. Dependence of the TTV efficiency on the change in the parameters of the engine and propulsor:
 1 – by 4 %, 2 % and 1 % respectively;
 2 – by 2 %, 2 % and 2 % respectively;
 3 – by 4 %, 0 % and 0 % respectively;
 4 – by 0 %, 4 % and 0 % respectively;
 5 – by 0 %, 0 % and 1 % respectively

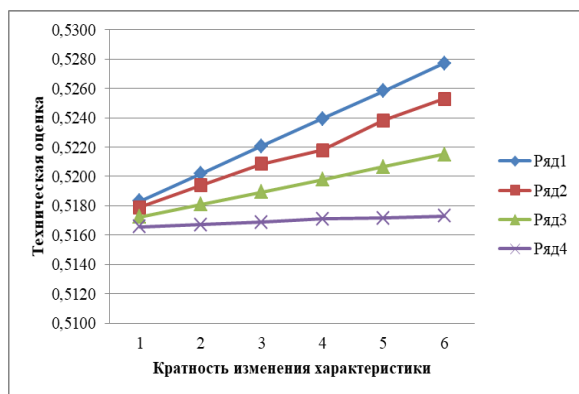


Рис. 11. Зависимость технической оценки ТТС λ_m от изменения массы, высоты, дорожного просвета, радиуса поворота:
 1 – на 4 %, 4 %, 1 % и 1 % соответственно;
 2 – на 5 %, 0 %, 0 % и 0 % соответственно;
 3 – на 2 %, 2 %, 2 % и 0 % соответственно;
 4 – на 0 %, 0 %, 0 % и 2 % соответственно

Fig. 11. Dependence of the TTV technical assessment λ_m on the change in mass, height, clearance, turning radius:

1 – by 4 %, 4 %, 1 % and 1 % respectively;
 2 – by 5 %, 0 %, 0 % and 0 % respectively;
 3 – by 2 %, 2 %, 2 % and 0 % respectively;
 4 – by 0 %, 0 %, 0 % and 2 % respectively

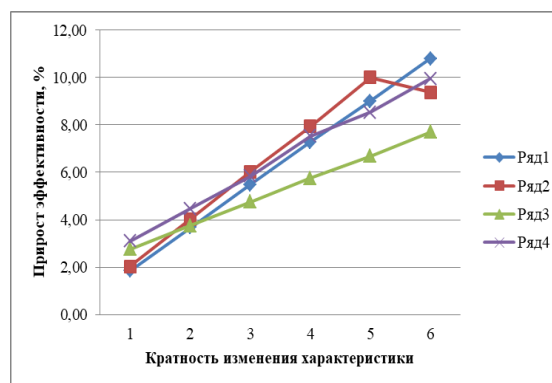


Рис. 12. Зависимость эффективности ТТС от изменения массы, высоты, дорожного просвета, радиуса поворота:

1 – на 4 %, 4 %, 1 % и 1 % соответственно;
 2 – на 5 %, 0 %, 0 % и 0 % соответственно;
 3 – на 2 %, 2 %, 2 % и 0 % соответственно;
 4 – на 0 %, 0 %, 0 % и 2 % соответственно

Fig. 12. Dependence of the TTV efficiency on the change in mass, height, clearance, turning radius:

1 – by 4 %, 4 %, 1 % and 1 % respectively;
 2 – by 5 %, 0 %, 0 % and 0 % respectively;
 3 – by 2 %, 2 %, 2 % and 0 % respectively;
 4 – by 0 %, 0 %, 0 % and 2 % respectively

У функции эффективности наблюдается экстремум в точке, соответствующей изменению конфигурационной характеристики более, чем на 16+4 %. При достижении этого значения эффективность снижается и целесообразно не менять конфигурацию исходного ТТС, а проектировать новую.

Выводы

Рассмотрена методика оценки эффективности использования ТТС по подвижности, отличающаяся более точными результатами по сравнению с существующими: она позволяет оценить возможность или невозможность движения не только качественно, но и количественно, прогнозируя скорость, с какой может двигаться ТТС. Предложен метод использования топографических карт высокой точности для определения характеристик местности. Расчет технической оценки колесных ТТС показал, что без учета характеристик участка местности наиболее эффективными являются образцы с колесной формулой 8x8 и большой мощностью двигателя (0,55 и 0,6), так как у них наибольший потенциал по грузоподъемности и надежности. Наименьшим показателем технической оценки обладают колесные ТТС колесной формулой 4x4 за счет малой грузоподъемности и меньших габаритов (0,5).

Существующие методики оценки эффективности не учитывают влияние параметров местности на движение; методики оценки проходимости не учитывают скоростные и топливные показатели ТТС. Эффективность колесных ТТС напрямую зависит от условий местности, на которой планируется их использование. Нельзя рассматривать эффективность использования колесных ТТС в отрыве от характеристик территории, по которой планируется движение. В ряде случаев использование больших ТТС с колесной формулой 8x8 неэффективно из-за рельефа и дискретных препятствий, в других – небольшие ТТС колесной формулой 4x4 неэффективны из-за малой грузоподъемности. Наиболее универсальны в применении на территории с несколькими смешанными типами препятствий колесные ТТС с колесной формулой 6x6.

Существует предел изменения конфигурационных характеристик в сторону увеличения технической оценки – в среднем на 16 %, дальнейшее изменение характеристик ухудшает показатель подвижности и эффективности по подвижности. При изменении габаритных характеристик: изменение высоты влияет незначительно на показатель эффективности (в пределах 1 %); изменение длины и ширины нецелесообразно более, чем на 16 %, изменение длины в 2,3 раза эффективнее изменения ширины. Так, при уменьшении длины на 4 % эффективность ТТС повышается на 4,16 %, а при уменьшении ширины на 4 % эффективность повысится на 1%. Одновременное уменьшение габаритных размеров на 7-10 % без изменения иных характеристик повышает эффективность на 7 %.

При изменении параметров двигателя и движителя: отдельное изменение параметров двигателя, движителя и протектора на 4 % увеличивает эффективность на 2,5-4 %, изменение на 8 % – на 5-7 %, изменение на 12 % – на 9-12 %. Одновременное изменение технических характеристик на 4 % увеличит эффективность ТТС на 10 %, изменение на 8 % увеличит эффективность на 24 %. Но при изменении показателей на 8 % и более при изменении других зависимых характеристик может повысить эффективность менее, чем на 24 % или потребовать внесения дополнительных изменений в конструкцию. При изменении полной массы на 25 % без снижения грузоподъемности следует увеличение эффективности на 10 %. Увеличение дорожного просвета целесообразно до 12 %, эффективность увеличивается на 3-5 %, но дальнейшее увеличение просвета нецелесообразно. Уменьшение радиуса поворота на каждые 4 % увеличивает эффективность на 1,2 %.

Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 72-77.
2. **Бабков, В.Ф.** Дорожные условия и безопасность дорожного движения / В.Ф. Бабков. – М.: Транспорт, 1993. – 271 с.
3. **Безбородова, Г.Б.** О направлениях научных исследований проходимости автомобилей // Известия вузов. Машиностроение. – 1965. – № 5. – С. 145-148.
4. **Гребенщиков, В.И.** Исследование проходимости автомобиля по мягким грунтам // Автомобильная промышленность. – 1956. – № 10. – С. 12-15.
5. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. Сетевое научное издание. – 2012. – № 5. URL: www.science-education.ru/105-6927 (дата обращения: 05.06.2012).
6. **Платонов, В.Ф.** Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины / В.Ф. Платонов, Г.Р. Леиашвили. – М.: Машиностроение, 1986. – 294 с.
7. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность-машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
8. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. Сетевое научное издание. – 2012. – № 3. URL: www.science-education.ru/103-6376 (дата обращения: 05.06.2012).
9. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2010. – № 12. – С. 10.
10. **Горелов, В.А.** Прогнозирование характеристик криволинейного движения автомобиля с колесной формулой бхб при различных законах управления поворотом колес задней оси / В.А. Горелов, Г.О. Котиев // Известия вузов. Сер. «Машиностроение». – 2008. – № 1. – С. 44-55.
11. **Котиев, Г.О.** Теория подрессоривания высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин : учебное пособие / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач, А.А. Стадучин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 196 с.
12. **Makarov, V.** Study of uneven surfaces distribution on forestry roads / V. Makarov, A. Markovkina, A. Papunin, A. Belyaev, K. Goncharov, V. Klubnichkin, E. Klubnichkin, V. Belyakov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177 (2019) 012041/ [Электронный ресурс] URL:

https://www.researchgate.net/publication/332323479_Study_of_uneven_surfaces_distribution_on_forest_ry_roads (дата обращения 10.03.2024). DOI:10.1088/1742-6596/1177/1/012041

13. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
14. **Антонов, А.С.** Армейские автомобили. Теория / А.С. Антонов, Ю.А. Кононович, Е.И. Магидович и др. – М.: Воениздат, 1970. – 527 с.
15. **Бабков, В.Ф.** Проходимость колесных машин по грунту / В.Ф. Бабков, А.К. Бируля, В.М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 189 с.
16. **Бабков, В.Ф.** Образование колеи при движении автомобиля // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. С. 94-115.
17. **Беляков, В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу. Дис... канд.тех.наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 1991. – 307 с.
18. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт», 2011. – 884 с.
19. **Наумов, В.Н.** Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым движителем / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, К.Е. Бяков // Известия вузов. Сер. «Машиностроение». – 2013. – № 12. – С. 31-35.
20. **Wong, J.Y.** Theory of Ground Vehicles. 3-rd Edition. – Wiley-Interscience, 2001. – 560 p.
21. **Dohnal, F.** Detection of Microrelief Objects to Impede the Movement of Vehicles in Terrain / F. Dohnal, M. Hubacek, K. Simkova // International Journal of Geo-Information, – 2019. – N 8 (3): – p. 101. DOI:10.3390/ijgi8030101

References

1. Belyakov V.V., Zeziulin D.V., Kolotilin V.E., Makarov V.S. 2013. “Podvizhnost' nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin” [Mobility of Ground Transport and Technological Machines]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University], no. 4 (101): 72-77.
2. Babkov V.F. 1993. *Dorozhnye usloviia i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniia* [Road Conditions and Traffic Safety]. Moscow: Transport.
3. Bezyborodova G.B. 1965. “O napravleniakh nauchnykh issledovaniu prokhodimosti avtomobilei” [On the Directions of Scientific Research on Vehicle Mobility]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie* [University News. Mechanical Engineering], no. 5: 145-148.
4. Grebenshchikov V.I. 1956. “Issledovanie prokhodimosti avtomobilia po miagkim gruntam” [Study of Vehicle Mobility on Soft Soils]. *Avtomobil'naia promyshlennost'* [Automotive Industry], no. 10: 12-15.
5. Zeziulin D.V., Vakhidov U.Sh., Makarov V.S. and Belyakov V.V. 2012. “Vliianie parametrov dvizhitelei na pokazateli effektivnosti kolesnykh mashin pri dvizhenii po snegu” [Influence of Propulsion System Parameters on Performance Indicators of Wheeled Vehicles Moving on Snow]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern Problems of Science and Education], no. 5. Accessed June 5, 2012. www.science-education.ru/105-6927.
6. Platonov V.F. and Leinashvili G.R. 1986. *Gusenichnye i kolesnye transportno-tiagovye mashiny* [Tracked and Wheeled Transport and Traction Vehicles]. Moscow: Mashinostroenie.
7. Bekker M.G. 1973. *Vvedenie v teoriu sistem mestnost'-mashina* [Introduction to the Terrain-Vehicle Systems Theory]. Moscow: Mashinostroenie.
8. Vakhidov U.Sh., Makarov V.S. and Belyakov V.V. 2012. “Matematicheskoe opisanie dorog tipa 'stone-road'” [Mathematical Description of 'Stone-Road' Type Roads]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern Problems of Science and Education], no. 3. Accessed June 5, 2012. www.science-education.ru/103-6376.
9. Goncharov K.O., Makarov V.S. and Belyakov V.V. 2010. “Eksperimental'nye issledovaniia mnogosnoi kolesnoi mashiny” [Experimental Studies of a Multi-Axle Wheeled Vehicle]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie* [Science and Education: Electronic Scientific and Technical Publication], no. 12: 10.
10. Gorelov V.A. and Kotiev G.O. 2008. “Prognozirovaniie kharakteristik krivolineinogo dvizheniia avtomobilia s kolesnoi formuloi 6kh6 pri razlichnykh zakonakh upravleniia povоротom koles zadnei osi” [Prediction of Curvilinear Motion Characteristics of a 6x6 Vehicle with Different Steering Laws for the Rear Axle Wheels]. *Izvestiia VUZov. Ser. “Mashinostroenie”* [University News. Series “Mechanical Engineering”], no. 1: 44-55.

11. Kotiev G.O., Sarach E.B. and Stadukhin A.A. 2023. *Teoriia podressorivaniia vysokopodvizhnykh dvukhvennykh gusenichnykh mashin* [Theory of Suspension for High-Mobility Two-Link Tracked Vehicles]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman.
12. Makarov V., Markovnina A., Papunin A. [et al.]. 2019. "Study of Uneven Surfaces Distribution on Forestry Roads". *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series* 1177: 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012041>.
13. Ageikin Ya.S. 1981. *Prokhodimost' avtomobilei* [Vehicle Cross-Country Mobility]. Moscow: Mashinostroenie.
14. Antonov A.S., Kononovich Yu.A., Magidovich E.I. [et al.]. 1970. *Armeiskie avtomobili. Teoriia* [Military Vehicles. Theory]. Moscow: Voenizdat.
15. Babkov V.F., Birulia A.K. and Sidenko V.M. 1959. *Prokhodimost' kolesnykh mashin po gruntu* [Cross-Country Mobility of Wheeled Vehicles on Soil]. Moscow: Avtotransizdat.
16. Babkov V.F. 1950. "Образование колеи при движении автомобиля" [Rut Formation During Vehicle Movement]. In *Trudy soveshchaniia po prokhodimosti kolesnykh i gusenichnykh mashin po tseline i gruntovym dorogam* [Proceedings of the Meeting on Cross-Country Mobility of Wheeled and Tracked Vehicles on Virgin Soil and Dirt Roads], 94-115. Moscow: Izd-vo AN SSSR.
17. Belyakov V.V. 1991. "Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многосных колесных машин по снегу" [Calculation Methodology and Analysis of Ways to Improve Cross-Country Mobility of Multi-Axle Wheeled Vehicles on Snow]. PhD diss., Nizhnii Novgorod.
18. Kravets V.N. and Selifonov V.V. 2011. *Teoriia avtomobilia* [Vehicle Theory]. Moscow: Grinlait.
19. Naumov V.N., Mashkov K.Yu. and Biakov K.E. 2013. "Modelirovanie priamolineinogo dvizheniia transportno-tekhnologicheskogo sredstva s rotorno-vintovym dvizhitelem" [Modeling of Straight-Line Motion of a Transport-Technological Vehicle with a Rotary-Screw Propulsion System]. *Izvestiia VUZov. Ser. Mashinostroenie* [University News. Series "Mechanical Engineering"], no. 12: 31-35.
20. Wong J.Y. 2001. *Theory of Ground Vehicles*. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience.
21. Dohnal F., Hubacek M. and Simkova K. 2019. "Detection of Microrelief Objects to Impede the Movement of Vehicles" in Terrain. *International Journal of Geo-Information* no. 8(3): 101. <https://doi.org/10.3390/ijgi8030101>.

**Дата поступления
в редакцию: 02.06.2025**

**Дата принятия
к публикации: 25.09.2025**