ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(8):95-110
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 553.97:622.331 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_95

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ МНОГОКРАТНОЙ ПРОХОДИМОСТИ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТА ПО СЛАБЫМ ГРУНТАМ

А.В. Михайлов[1], Ю.А. Казаков[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: s185048@stud.spmi.ru

Аннотация: В условиях карьерной разработки торфяных месторождений необходим многократный проезд горнотранспортных агрегатов по слабому грунту. Проведен анализ проходимости горнотранспортного агрегата по слабым грунтам в условиях карьерной добычи торфяного сырья. Определены пределы прочности торфяного основания [τ] = 13,9 кПа и [q] = 146 кПа для оценки транспортирования торфяного сырья по слабым грунтам. Разработана методика выбора комплекта шин для колесного хода полуприцепа. Для ряда типоразмеров шин определены зависимости среднего максимального давления полуприцепа на грунт ММР (mean maximum pressure) от основных параметров шин с получением математической модели. С помощью показателя конусного индекса многократной проходимости для каждого из типоразмеров шин (VCI_{50}) определена связь типов транспортных средств с предельными значениями прочности торфяного основания. Обоснована структура горнотранспортного агрегата, состоящего из тягового энергетического средства в виде трактора БЕЛАРУС-1221.4 со сдвоенными колесами и двухосного полуприцепа массой 1585 кг и массой транспортируемого сырья 4000 кг, обоснован рациональный комплект радиальных флотационных шин 600/50R22.5 для полуприцепа со сдвоенными колесами. При физическом моделировании установлен характер изменения осадки модели сдвоенных колес двухосного полуприцепа. Отмечены гистерезис осадки после двукратного прохода, равный 75–85%, ее стабилизация уже после 7-го цикла нагружения и увеличение площади пятна контакта колес с уплотнением поверхности следа, что повышает многократную проходимость. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании горнотранспортных агрегатов для обеспечения их многократной проходимости по слабым грунтам при освоении территорий.

Ключевые слова: карьер, слабый грунт, экскавированное торфяное сырье, транспортирование, горнотранспортный агрегат, полуприцеп, шины, проходимость.

Для цитирования: *Михайлов А. В., Казаков Ю. А.* Методология оценки многократной проходимости горнотранспортного агрегата по слабым грунтам // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 95–110. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_95.

Estimation procedure of multiple passability of hauling unit on weak ground

A.V. Mikhailov[1], Yu.A. Kazakov[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: s185048@stud.spmi.ru

© А.В. Михайлов, Ю.А. Казаков. 2022.

Abstract: Peat cutting involves multiple passes of hauling units on weak ground. The hauling unit passability on weak ground is analyzed in the condition of peat extraction pits. The ultimate strengths of peat ground are determined as [τ] =13.9 kPa and [q] =146 kPa in the assessment of peat haulage on weak ground. The procedure is developed for selecting semi-trail wheel travel tires. For some tire sizes, the relations of the mean maximum pressure (MMP) of the semi-trailer and the main tire parameters are obtained from mathematical modeling. Using the cone index, the connection of haulage vehicles with maximum strengths of peat ground is determined for multiple passes (VCI_{50}) for each tire size. The structure of a hauling unit is validated to be composed of a power-driven traction device represented by double-wheeled tractor BELARUS-1221.4 and a tandem-axle semi-trailer 1585 kg in weight to transport load of 4000 kg, and the efficient set of radial flotation tires 600/50R22.5 is substantiated for a double-wheeled semi-trailer. Physical simulation determined the draft behavior of the double-wheel model of the tandem-axle semi-trailer. It is found that draft has a hysteresis of 75–85% after double pass and stabilizes after the 7th loading cycle, and the contact area of wheels with the compacted wheel track surface grows, which increases multiple passability. The research results can be used in design of hauling units toward their multiple passability on weak ground in any territory development.

Key words: open pit, weak ground, excavated peat, haulage, hauling unit, semi-trailer, tires, passability.

For citation: Mikhailov A. V., Kazakov Yu. A. Estimation procedure of multiple passability of hauling unit on weak ground. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(8):95-110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_95.

Введение

Исходя из анализа общих процессов горного производства открытым способом, одной из трудных задач для оптимизации работ является выбор состава парка экскаваторов и самосвалов и разработка долгосрочного графика добычи, который сводит к минимуму транспортные и другие постоянные расходы, что также актуально для разработки торфяных месторождений карьерным методом [1, 2]. Добыча торфяного сырья карьерным способом — это процесс разработки торфяного месторождения с помощью глубокого карьера, который вырабатывается в один выемочный уступ на всю глубину торфяной залежи [3, 4].

При разработке полезных ископаемых карьерным способом обычно широко используется традиционная система экскаватор — самосвал [5, 6]. Система включает в себя дискретные циклы выемки-погрузки и транспортирования, производительность которых характеризуются временем рабочего цикла.

Многократность проезда горнотранспортного агрегата может быть обеспечена снижением сопротивлений, преодолеваемых тяговым устройством.

Транспорт — важнейшая составная часть производственной инфраструктуры горного производства, в частности при карьерной добыче торфяного сырья на слабых грунтах. Его устойчивое и эффективное функционирование является необходимым условием устойчивого развития горной промышленности страны. Потребительские качества выпускаемых транспортных средств, их номенклатура и технический уровень не в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к освоению

территорий со слабыми грунтами, значительная доля которых расположена в зонах северного умеренного пояса и арктической зоне территории России [7]. Торфяные грунты, как правило, имеют очень низкую несущую способность из-за высокого содержания воды и относительно низкой плотности торфяной залежи как в естественном, так и в частично осушенном состоянии. Предложенный в статье подход к определению условий проходимости транспортного оборудования позволяет классифицировать слабые грунты на территории механизированного карьера по критерию их несущей способности.

Торфяная залежь — малопрочное и легкодеформируемое основание, по которому перемещаются транспортные машины. Поэтому выбор типа и необходимых размеров опорных поверхностей ходового устройства машины производится с учетом деформационных и прочностных свойств верхнего слоя торфяной залежи, характеризующих ее поведение при воздействии внешних нагрузок [8].

Для выполнения транспортных задач на слабых грунтах предпочтительным является применение горнотранспортного агрегата (ГТА), состоящего из тягового устройства (трактора) и полуприцепа. Среди рассмотренных транспортно-технологических систем наибольшее распространение получили тракторные самосвальные полуприцепы. Эти машины обладают высокой маневренностью, низкими затратами операционного времени при разгрузке. Транспортировка экскавированного торфяного сырья на карьере может осуществляться горнотранспортными агрегатами, состоящими из трактора БЕЛАРУС-1221.4 [10, 11] тягового класса 2 т со сдвоенными колесами и самосвального двухосного полуприцепа со сдвоенными колесами. Выбранные элементы ГТА широко используются также в лесной и сельскохозяйственной отраслях промышленности.

Процесс добычи торфяного сырья с помощью выемочно-транспортного комплекса в составе экскаватора и самосвалов является гибким и подходит для геологически сложных торфяных месторождений различной конфигурации и глубины залежи; горнотранспортный агрегат циклично совершает транспортирование экскавированного сырья от забоя до отвала, совершая многократный проезд по месторождению по одной и той же траектории (рис. 1). Время цикла ГТА измеряется с момента операции загрузки кузова полуприцепа экскаватором, ГТА двигается груженым до места

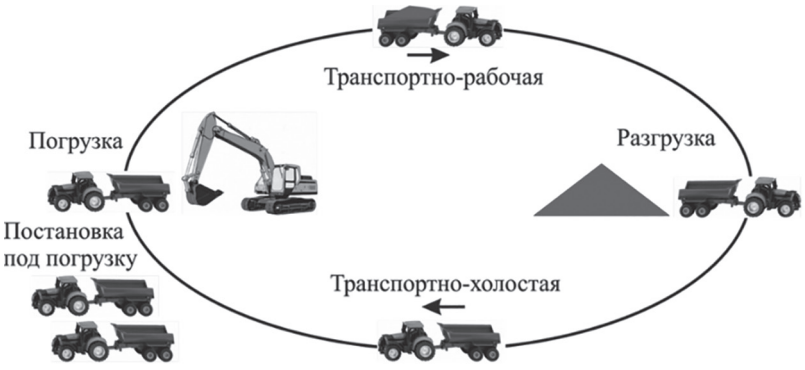

Рис. 1. Схема цикличного транспортирования экскавированного сырья от забоя до отвала
Fig. 1. Flow chart of cyclic haulage of excavated raw material from face to stockpile

разгрузки, выгружает материал и возвращается порожним к экскаватору с позиционированием для погрузки [3].

Цель исследования — поиск рациональной комплектации шинами тракторного полуприцепа в условиях его эксплуатации.

В работе представлена оценка параметров полуприцепа в составе горнотранспортного агрегата, поскольку полуприцеп, в основном, является ведомой транспортной единицей, чрезмерная нагрузка на которую при эксплуатации на слабых грунтах может нарушить стабильность процесса транспортирования экскавированного торфяного сырья.

Анализ условий проходимости горнотранспортного агрегата по слабым грунтам

Выбор параметров горнотранспортного агрегата напрямую зависит от условий эксплуатации, ограничивающих диапазон его применения и режимы эксплуатации. Ограничением для проезда транспортных средств при карьерной добыче торфяного сырья являются характеристики торфяного месторождения как основания. Таким образом, при выборе параметров ГТА, эксплуатируемого в условиях карьерной добычи органогенного сырья, в первую очередь необходимо руководствоваться критерием проходимости по слабым грунтам. Требуемая проходимость колесного оборудования на влажных слабых грунтах обеспечивается снижением удельных давлений на площадке контакта шины колеса с грунтом. Среднее удельное давление шины на опорную поверхность колеблется в пределах 0,05… 0,18 МПа [12, 13].

Согласно исследованиям Л.С. Амаряна [14], величина удельного давления больше 38 — 50 кПа соответствует хорошей проходимости обычных гусеничных и даже колесных машин. Торфяная залежь характеризуется допустимым нормальным давлением q и пределом прочности на сдвиг τ. Эти величины характеризуют ограничения удельного давления в пятне контакта шин с грунтом, превышение которых означает повышенное буксование и возможное застревание машин.

М.М. Танклевский рекомендует следующие значения среднего допустимого давления для колесных опор машин на торфяной залежи [14]:

- при осушении и подготовке торфяной залежи к эксплуатации — 23 кПа;
- при производстве фрезерного торфа — 38 кПа;
- при производстве кускового торфа — 48 кПа.

Полная масса транспортного средства и площадь контакта колес с деформируемым основанием имеют решающее значение для определения результирующего давления на грунт. Двумя широко используемыми практическими методами являются модель индекса конусности транспортных средств (VCI) экспериментальной станции водных путей (WES) и концепция среднего максимального давления (MMP), предложенная D. Rowland [14, 15].

Международное общество систем наземных транспортных средств (ISTVS) определяет VCI как минимальную прочность грунта в критическом слое грунта с точки зрения индекса конусности, требуемую для определенного количества проходов транспортного средства, обычно один проход (VCI_1) или 50 проходов (VCI_{50}) [17].

Параметр MMP относится к характеристикам слабых грунтов и обеспечивает минимальную проходимость по удельному давлению на грунт путем получения среднего значения максимального давления на каждом колесе и связан с размерами колеса, а также с массой транспортного средства. Оценка прохо-

Таблица 1

Классификация проходимости колесного оборудования, основанная на количестве проходов
Classification of wheeled equipment passability by number of passes

Количество проходов	Технический предел	Условия проходимости
1 — 3	невозможно	неудовлетворительно
3 — 5		неудовлетворительно
6 — 10	возможно, экономично	удовлетворительно
11 — 25		хорошо
⩾25	возможно, экономично, благоприятно для окружающей среды	отлично

димости с помощью ММР включает в себя предварительное определение размерно-массовых характеристик колес и их количества.

Для флотационных сдвоенных шин полуприцепа с двумя осями модель D. Rowland (кПа) может быть определена эмпирическим выражением

$$MMP = \frac{1{,}18G_M}{\left(m + w_k / 2\right)B\sqrt{DH}}, \qquad (1)$$

где $G_м$ — вес машины с грузом, кН; m — количество осей, шт.; B — ширина колеса, м; D — диаметр колеса, м; H — высота профиля, м; $w_к$ — общее число колес машины.

Оценка проходимости горнотранспортного агрегата по показателю ММР является надежной, точной и простой, в сравнении с другими способами определения давления колес на грунт [18].

Техническим пределом ситуации проходит/не проходит является 1 проход [19]. Условия многократной проходимости могут быть классифицированы как хорошие, если возможны 50 проходов машины по колее.

Для определения многократной проходимости колесной техники необходимо руководствоваться сравнением расчетного значения ММР с допустимыми значениями удельных давлений, представленных по материалам анализа источников.

Эксплуатационная эффективность транспортных машин улучшается как функция количества ожидаемых проходов, и, таким образом, от 2 до 5 предельных проходов могут быть установлены как самый низкий экономический предел проходимости ГТА по слабым грунтам (табл. 1) [19].

Таблица 2

Рекомендуемые D. Rowland значения среднего максимального давления (MMP) для машин высокой проходимости
D. Rowland's proposed mean maximum pressure (MMP) for high passability machines

Грунтовые условия	Среднее максимальное давление (ММР), кПа		
	для многократных проходов		для одного прохода
	идеальное значение	удовлетворительное значение	
Торфяники	30	50	60
Тундра и европейские болота	5	10	15
Снег	10	25…30	40

Условия многократной проходимости могут быть классифицированы как хорошие, если возможны 25 проходов машин по колее [17].

В зависимости от условий эксплуатации ГТА на слабых грунтах D. Rowland рекомендует значения среднего максимального давления для машин высокой проходимости (табл. 2) [14].

Инженерными исследователями армии США предложен показатель конусного индекса (VCI) для количественной оценки способности транспортных средств преодолевать пересеченную местность с мягким грунтом. VCI определяется как минимальная прочность грунта, необходимая для того, чтобы самоходное транспортное средство последовательно и без остановок совершало заданное количество проходов по пути.

Модель индекса конусности полуприцепа VCI_{50} определена на основе модели A. Rula и J. Nuttall [15] с анализом индекса мобильности полуприцепа MI и поправочным коэффициентом для учета влияния прогиба шины δ с низким давлением накачивания на характеристики VCI_{50} [23]:

$$VCI_{50} = \left[28,83 + 0,43MI - \left(\frac{92,67}{MI + 3,67}\right)\right]\left(\frac{0,15}{\delta / h}\right)^{0,25}. \quad (2)$$

Взаимосвязь показателей ММР и VCI_{50} описывает выражение, эмпирически полученное для связных грунтов. VCI_{50} соответствует пятидесяти проходам транспортного средства по слабому грунту [16].

$$VCI_{50} = 0,27\ MMP. \quad (3)$$

Диапазоны минимальных значений VCI_1 и VCI_{50} характеризуют транспортные средства по категориям, представленным в табл. 3.

В результате статистического анализа данных по оценке проходимости торфяных машин с учетом несущей способности торфяной залежи верхового типа [18] определены предельные значения прочности торфяного основания [τ] = = 13,9 кПа и [*q*] = 146 кПа. Также многократная проходимость машин, подготовленных к эксплуатации в условиях торфяного карьера, практически возможна при значении ММР = 30 — 50 кПа. Для сравнения, известно, что широко

Таблица 3

Классификация условных категорий транспортных средств в соответствии с минимальными требованиями CI (VCI_1 и VCI_{50})
Classification of conditional vehicle categories in conformity with the minimum requirements of CI (VCI_1 and VCI_{50})

Категория	Диапазон		Транспортные средства
	VCI_1	VCI_{50}	
1	<12	<29	Легкие средства с низким удельным давлением (менее 13,8 кПа)
2	12–21	30–49	Специальные тракторы со сравнительно широкими гусеницами и низким удельным давлением
3	21–26	50–59	Тракторы со средним удельным давлением, прицепные машины с очень низким удельным давлением
4	26–30	60–69	Тракторы со всеми ведущими колесами, прицепные машины с низким удельным давлением
5	31–35	70–79	Большинство тракторов со всеми ведущими колесами, прицепные машины
6	35–44	80–99	Большинство тракторов, прицепные машины

используемое максимальное давление на поверхность грунта при проведении лесохозяйственных работ на торфяных грунтах составляет 50 кПа [21]. Также следует, что при осуществлении разработки торфяных месторождений большинство тракторов с прицепными устройствами относятся ко 2-й категории по классификации табл. 3, где $12 < VCI_1 < 21$ и $30 < VCI_{50} < 49$.

Для определения многократной проходимости колесного транспортного оборудования по торфяной залежи необходимо руководствоваться сравнением расчетного значения ММР с допустимыми значениями удельных давлений, а также выявлением взаимосвязи ММР с VCI_{50}, представленным по материалам анализа проходимости машин по слабым грунтам.

Исходя из осуществленного анализа, следует, что основным показателем, влияющим на величину погружения пневматического колеса в деформируемое опорное основание, является величина давления в пятне контакта шины с торфяной залежью. Снизить величину давления колеса на грунт возможно путем увеличения площади пятна контакта за счет уменьшения давления воздуха в шинах колес до 100 кПа, а также путем сдваивания колес на осях [22].

Методика выбора типоразмера шин для транспортного средства

В настоящее время для тракторных прицепов созданы флотационные низкопрофильные шины с отношением высоты профиля к его ширине $H/B = 0{,}4—0{,}6$. Применение таких шин при снижении давления накачивания до 100 кПа позволяет существенно снизить удельное давление на грунт, приближая этот показатель к максимально допустимому по ГОСТ 7057-2001. Комплектация шинами вносит значительный вклад в общие эксплуатационные расходы транспортного средства из-за потерь энергии во время движения, определяемых сопротивлением качению, и стоимости самих шин.

Задача выбора шин имеет ряд ограничений, связанных с производительностью и эксплуатационными расходами, которые варьируются от структуры транспортных средств, горно-геологических условий и воздействия окружающей среды [23]. Чтобы оценить проходимость горнотранспортного агрегата по слабым грунтам с помощью показателя ММР, необходимо определить массу полуприцепа и перевозимого груза.

Оценка проходимости с помощью ММР включает в себя предварительное определение размерно-массовых характеристик колес и их количества [17]. В табл. 4 представлено сравнение расчетных значений показателя ММР ряда радиальных флотационных шин. В рамках анализа проведено сравнение расчетных значений показателя ММР ряда радиальных флотационных шин полуприцепа (16 типоразмеров $D = 1045—1270$ мм; $B = 500—700$ мм) при массе груза в кузове 4000 кг и массе полуприцепа без учета массы колес 1585 кг.

Выбор рациональных образцов шин по ряду показателей, включая геометрические размеры и массу, влияет на процесс функционирования транспортного оборудования, его опорную проходимость и повышение энергоэффективности транспортного процесса [24]. Задача выбора рациональных размеров шин для комплектования транспортного полуприцепа представляет определенную сложность и является актуальной, учитывая стоимость инновационных решений по выбору оборудования.

Среднее максимальное давление ММР определяется в основном шириной B (мм), диаметром шин D (мм) и полным весом груженого полуприцепа G_M (кН). С помощью дробного факторного экспе-

Таблица 4

Показатели радиальных флотационных шин для комплектования двухосного полуприцепа со сдвоенными колесами
Characteristics of radial flotation tires for furnishing double-wheeled tandem-axle semi-trailer

Типоразмер шин	Ширина *B*, м	Диаметр *D*, мм	Высота профиля *H*, мм	Вес прицепа с грузом $G_м$, кН	Среднее максимальное давление ММР, кПа	Индекс мобильности, MI	Индекс конусности транспортного средства (VCI), psi	
							VCI_1	VCI_{50}
500/45R22.5	500	1045	225	52,71	42,50	26,79	13,31	31,42
500/50R22.5	500	1070	250	52,79	40,15	26,27	13,19	31,15
500/60R22.5	503	1172	300	54,20	35,74	23,79	12,67	30,03
550/45R22.5	550	1070	248	53,58	37,63	24,95	12,93	30,57
550/60R22.5	537	1232	330	54,73	31,42	21,47	11,93	28,95
560/45R22.5	543	1076	252	55,54	37,24	24,35	12,82	30,33
560/60R22.5	567	1247	330	55,38	29,95	21,19	12,12	29,18
600/50R22.5	631	1172	315	56,32	28,89	20,29	11,90	28,32
600/55R22.5	600	1230	330	56,64	26,27	20,65	12,00	28,53
700/40R22.5	700	1170	280	58,13	28,58	19,44	11,72	27,84
650/50R22.5	650	1222	325	58,75	29,58	20,26	11,92	28,34
710/45R22.5	700	1270	320	59,93	26,41	19,15	11,63	27,71
650/40R22.5	640	1085	256	60,48	35,26	22,99	12,49	29,62
620/50R22.5	610	1185	305	56,09	30,08	20,64	11,98	28,50
620/40R22.5	610	1080	244	55,30	34,73	21,48	12,17	28,92
600/40R22.5	600	1100	240	56,24	35,88	24,58	12,58	30,40

римента получена математическая модель изменения среднего максимального давления ММР от параметров полуприцепа в натуральном виде, все члены которой значимы, а сама модель проверена на адекватность по критерию Фишера ($F = 16{,}34 < F_{табл} = 235$):

$$MMP = 82{,}5 - 0{,}05B - 0{,}04D + 0{,}43G_M \quad (4)$$

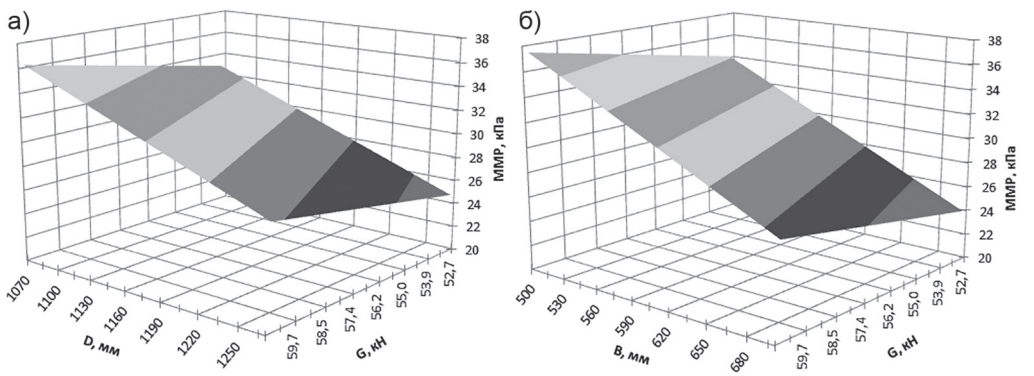

Рис. 2. Трехмерные графики функции ММР для тракторного полуприцепа со сдвоенными колесами на флотационных шинах: в зависимости от наружного диаметра (а); в зависимости от ширины шины (б)
Fig. 2. 3D MMP plots for tractor semi-trailer with double wheels and flotation tires: as function of outer diameter (a); as function of tire width (b)

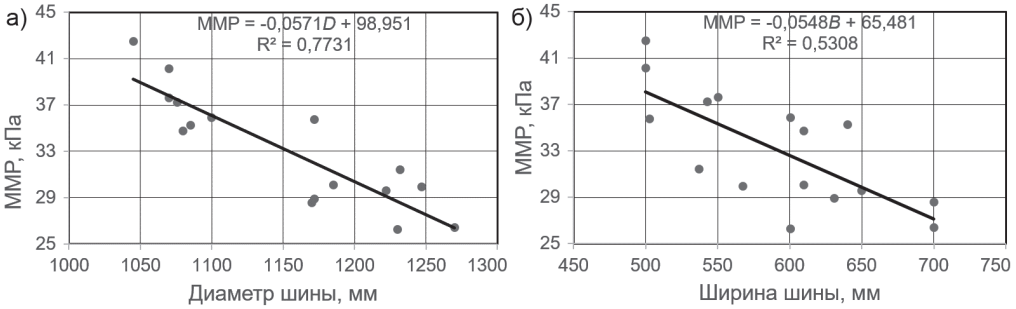

Рис. 3. Значения ММР для тракторного полуприцепа со сдвоенными колесами на флотационных шинах: в зависимости от наружного диаметра (а); в зависимости от ширины шины (б)

Fig. 3. MMP values for tractor semi-trailer with double wheels and flotation tires: as function of outer diameter (a); as function of tire width (b)

Широкая флотационная шина создает увеличенную площадь контакта и меньшее проникновение в грунт, что увеличивает проходимость горнотранспортного агрегата. Метод сдваивания колес на осях также улучшает проходимость горнотранспортного агрегата по слабому грунту. Увеличение диаметра шины способствует снижению тягового усилия на перекатывание полуприцепа [25].

Созданная трехмерная модель (см. рис. 2) позволяет предварительно оценить среднее максимальное давление, создаваемое полуприцепом на слабое основание при использовании ряда типоразмеров шин. Для каждого из типоразмеров радиальных флотационных шин (табл. 4) были определены ММР, VCI_1 и VCI_{50} и получены графики зависимости ММР от основных параметров шин (рис. 3).

На рис. 4 показана связь между ММР и значениями VCI_{50} для торфяных грунтов.

Для оценки многократной проходимости ГТА необходимо рассматривать параметр VCI_{50}. Для торфяного тракторного полуприцепа получено эмпирическое выражение (5), связывающее индекс конусности транспортного средства и значение среднего максимального давления на каждом колесе полуприцепа:

$$VCI_{50} = 22 + 0{,}22MMP \qquad (5)$$

Исходя из проведенного анализа предельных значений прочности торфяных грунтов, можно наглядно изобразить диапазон возможности многократного про-

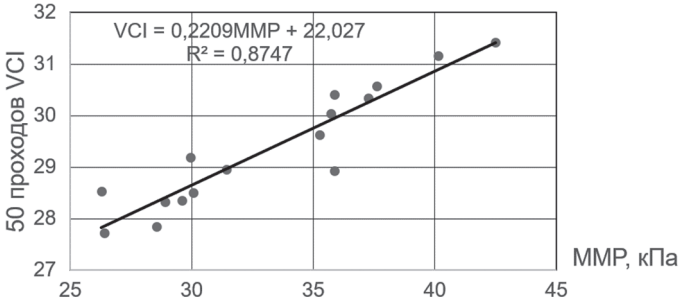

Рис. 4. Корреляция индекса конусности транспортного средства и среднего значения максимального давления на каждом колесе VCI_{50}

Fig. 4. Correlation of vehicle cone index and mean maximum pressure at each wheel VCI_{50}

Рис. 5. Классификация условий проходимости транспортных средств по торфяному основанию
Fig. 5. Classification of passability conditions of vehicles on peat ground

езда горнотранспортных агрегатов по торфяным залежам с разной степенью осушенности.

На рис. 5 приведена классификация условий проходимости транспортных средств по торфяному основанию с оценкой диапазонов вероятности движения по осушенной и предварительно осушенной торфяным залежам [16]. Заштрихованные зоны на рис. 5 показывают вероятность многократной проходимости исследуемого полуприцепа в диапазоне $P_г$ = 75—90% по предварительно осушенной торфяной залежи.

С учетом уточненного диапазона высокой вероятности многократной проходимости полуприцепа по торфяным месторождениям сравнительная оценка типоразмера шин тракторного полуприцепа с применением метода «матрица принятия решений» (матрица Pugh) [26] позволила систематизировать ряд факторов, влияющих на выбор (размеры, масса и стоимость шин) и оценить весомость каждого из них.

В итоге для рациональной комплектации полуприцепа шинами определена радиальная флотационная шина типоразмера 600/50R22.5 при значении величин ММР = 28,89 кПа и VCI_{50} = = 28,32 psi.

Результаты лабораторных исследований многократной проходимости

Для оценки количества проходов и глубины осадки ГТА со сдвоенными колесами в торфяной грунт проведено физическое моделирование процесса проезда колесного транспорта по слабому грунту. Модель грунта — 2 натуральных монолита естественной влажности w = 89% и w = 84%, извлеченных из торфяной залежи без нарушения деятельного верхнего слоя (акротелм), размерами 670×370×300 мм (торфяное месторождение «Озерное» Всеволожского района Ленинградской области, кадастровый номер 665).

Модель колеса — сдвоенные на оси колеса, тип шины R330/88. Давление в шине принято атмосферное, для моделирования максимального прогиба шины с учетом установки предельной минимизации ее жесткости.

В ходе эксперимента воспроизведен процесс нагрузки, создаваемой сдвоенными колесами двух последовательно расположенных осей — двойное нагружение штампа подряд, для имитации проезда двухосного полуприцепа. При этом нагружение и деформирование верхнего слоя торфяной залежи происходит

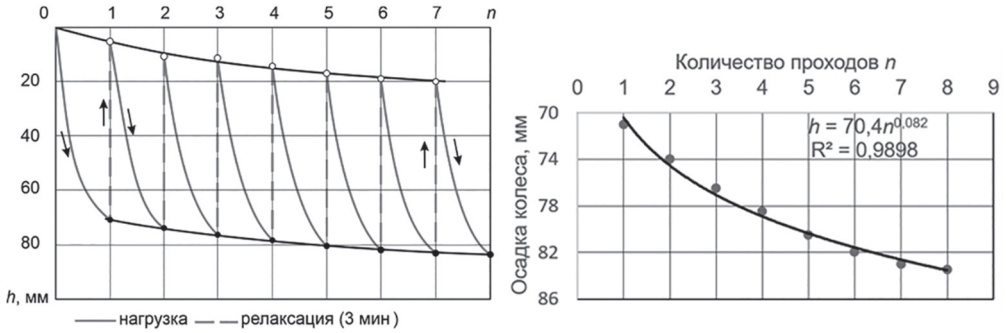

Рис. 6. Характер нагружения грунта с изменением глубины осадки в зависимости от количества двойных проходов сдвоенных колес по неосушенной торфяной залежи (w = 89%)

Fig. 6. Loading on soil at varied draft depth depending on number of double passes of double wheels on undrained peat ground (w=89%)

в течение долей секунды. Создаваемая нагрузка на сдвоенные колеса принята постоянной — 900 Н, соответствует давлению 30 кПа, необходимому для моделирования аналитически выбранного типоразмера шин 600/50R22.5 при значении ММР = 28,89 кПа и VCI_{50} = = 28,32 psi. После двух циклов нагружения происходила выдержка (3 мин) грунта без нагрузки до стабилизации величины его осадки.

В зависимости от количества двойных проходов колес отмечено увеличение их осадки (рис. 6, 7). Модель материала отражает деформационную анизотропию в условиях линейного растяжения-сжатия (эффект Баушингера). Свойствами упругого вязкого материала, отражающими его сопротивление малоцикловой нагрузке, являются циклическая нестабильность (изменение ширины петли упругого гистерезиса в процессе нагружения) и одностороннее накопление во времени пластических деформаций. Постепенный спад во времени напряжений (релаксация) характерен для этой грунтовой системы; при этом происходит диссипация энергии на вязком элементе, запасенной на упругом элементе, что описывает поведение системы в таком режиме механически необратимым.

При приложении давления общая осадка грунта может быть разделена на восстанавливаемую (упругую) h_e и остаточную (пластическую) h_p. При этом,

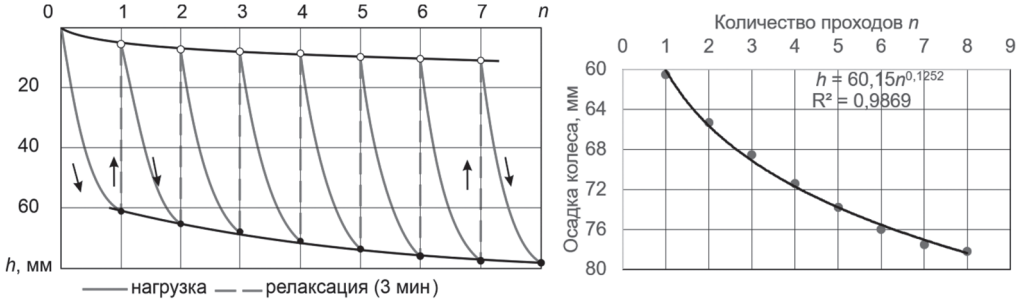

Рис. 7. Характер нагружения грунта с изменением глубины осадки в зависимости от количества двойных проходов сдвоенных колес по осушенной торфяной залежи (w = 84%)

Fig. 7. Loading on soil at varied draft depth depending on number of double passes of double wheels on drained peat ground (w = 84%)

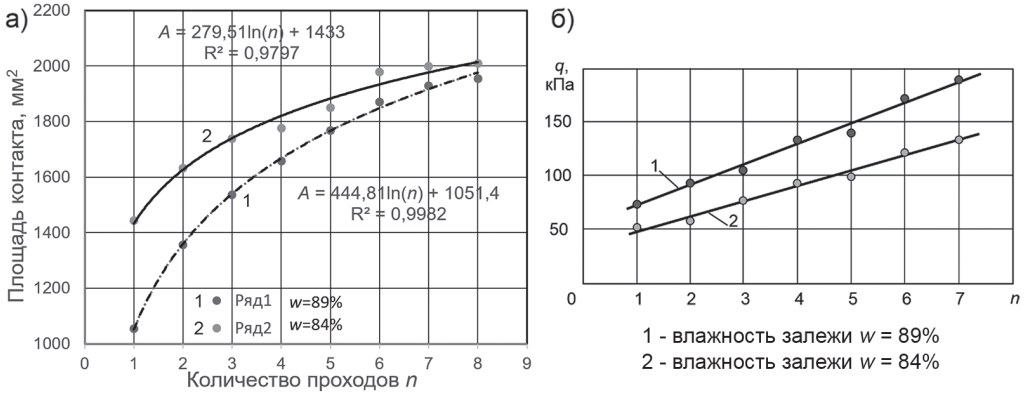

Рис. 8. Изменение площади контакта сдвоенных колес (а) и удельное сопротивление грунта на поверхности следа колес (б) в зависимости от количества двойных проходов по ненарушенной торфяной залежи

Fig. 8. Change in contact area of double wheels (a) and specific soil resistance on wheel track surface (b) as function of number of double passes on intact peat ground

как правило, $h_e >> h_p$ (рис. 6, 7). При влажности монолита w = 89% упругая составляющая h_e в 4 раза больше, чем пластическая h_p, а при w = 84% h_e в 8 раз больше, чем h_p.

В значительной степени проходимость транспортных средств по поверхности торфяной залежи зависит от структуры торфяной залежи — волокнистой и губчатой, свойственной всем сфагновым торфам малой степени разложения, слагающим верхние слои залежей. Структура торфа и его текстурные особенности определяют прочность верхнего торфогенного слоя, образованного волокнами переплетения (срастания) растений-торфообразователей и их корнями и корневищами, который является несущим и наиболее прочным слоем залежи [14]. Подвижность транспортного средства зависит от его способности эффективно использовать прочность этого растительного мата без разрывов [27].

Соответственно, требования по ограничению массы горнотранспортного агрегата и снижению сил сопротивления при передвижении обусловливают максимально допустимую глубину колеи $h_к$ после первого прохода в пределах $h_к$ = = 0,10 м с учетом упругого восстановления слоя залежи. Таким образом, после 7-го нагружения глубина колеи $h_к$ стабилизируется и не превышает предельного значения глубины колеи, что предотвращает бульдозерный эффект перед колесами [12].

На рис. 8 показано изменение площади контакта сдвоенных колес и удельного сопротивления грунта на поверхности следа колес. Удельное сопротивление уплотняемого грунта по следу колес определялось методом пенетрации согласно ГОСТ 34276-2017.

Для многократного проезда транспортного оборудования по слабым грунтам нежелателен бульдозерный эффект. При данном условии осадка колес в грунт не должна превышать 0,1 м.

Величина удельного сопротивления грунта по следу колеи при многократном двойном последовательном нагружении монолита колесами достигает 200 кПа для залежи влажностью 89% и 140 кПа для залежи влажностью 84%. При достижении уже 7 нагружений на поверхность торфяного монолита влажностью 84 и 89% установлено, что величина осадки стабилизируется, а пло-

щадь пятна контакта с неосушенной залежью и удельное сопротивление грунта на поверхности следа колес увеличиваются в 1,9 и 2,7 раза соответственно, что определяет возможность осуществления многократной проходимости ГТА при использовании двухосного полуприцепа со сдвоенными радиальными флотационными шинами типоразмера 600/50R22.5.

Заключение

Проведен анализ прочностных характеристик слабых грунтов в условиях карьерной добычи торфяного сырья. Определены пределы прочности торфяного основания [τ] = 13,9 кПа и [q] = = 146 кПа для оценки транспортирования грузов по слабым грунтам. Для различных типоразмеров шин D = 1045 — 1270 мм; B = 500 — 700 мм определены зависимости среднего максимального давления на грунт ММР от основных параметров шин. Получена математическая модель зависимости ММР от трех основных факторов, влияющих на проходимость горнотранспортного агрегата по слабому грунту. С помощью показателя конусного индекса для каждого из типоразмеров шин (VCI_{50}) определена связь классификации транспортных средств с предельными значениями прочности торфяного основания. Для горнотранспортного агрегата, состоящего из тягового энергетического устройства в виде трактора BELARUS-1220.4 и двухосного полуприцепа массой 1585 кг и массой транспортируемого сырья 4000 кг, обоснован рациональный комплект радиальных флотационных шин 600/50R22.5 для полуприцепа. В результате физического моделирования процесса многократной проходимости модели сдвоенных колес двухосного полуприцепа на натуральном монолите торфяной залежи верхового типа выявлены закономерности изменения осадки колес при стабилизации ее величины после 7-го прохода и эффекта релаксации напряжений за счет упругой составляющей на 75 — 85% в зависимости от степени осушенности верхнего несущего слоя залежи. Кроме того, наблюдается рост площади пятна контакта колеса с увеличением осадки и уплотнение поверхности колеи с увеличением числа проходов колес, что положительно влияет на проходимость транспортного средства.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании горнотранспортных агрегатов для многократной транспортировки грузов по слабым грунтам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burt C., Caccetta L.* Equipment selection for surface mining: a review // Journal Interfaces Archive. 2014, vol. 44, no. 2, pp. 143 — 162.

2. *Mikhailov A. V.*, *Garmaev O. Z.*, *Garifullin D. R.*, *Kazakov Y. A.* A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, no. 1, article 012086. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012086.

3. *Иванов С. Л.*, *Иванова П. В.*, *Кувшинкин С. Ю.* Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. — 2020. — Т. 242. — С. 228 — 233. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.

4. *Фомин С. И.*, *Фауль А. А.*, *Пономарев А. И.* Оценка надежности работы технологических схем с мобильными дробильными комплексами // Записки Горного института. — 2011. — Т. 190. — С. 51 — 56.

5. *Фауль А. А.* Определение параметров и показателей открытой разработки месторождений нерудных строительных материалов с использованием мобильных дробильных комплексов: Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 25.00.21. — СПб.: СПбГУ, 2012. — 20 с.

6. *Лапшин Н. С.* Обоснование организационно-технических методов открытой разработки песчано-гравийных месторождений с использованием мобильных дробильно-сортировочных комплексов: Автореферат дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.22. — СПб.: СПбГУ, 2012. — 20 с.

7. *Litvinenko V.* Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development // Chemie der Erde. 2020, vol. 80, no. 3, article 125652. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125652.

8. *Зюзин Б. Ф.*, *Жигульская А. И.*, *Юдин С. А.* Дистортность в методологии взаимодействия технологических машин с торфяной залежью. — Тверь: ТГТУ, 2021. — 168 с.

10. *Kuvshinkin S. Y.*, *Ivanova P. V.* Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, no. 378, pp. 1 — 5.

11. *Shibanov D. A.*, *Ivanov S. L.*, *Shishkin P. V.* Digital technologies in modeling and design of mining excavators // Journal of Physics: Conference Series. 2021, no. 1753, pp. 1 — 6.

12. *Фомин В. М.* Автомобили. Теория эксплуатационных свойств автомобилей. — М.: РУДН, 2008. — 112 с.

13. *Taghavifar H., Mardani A.* Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2014, no. 13, pp. 57 — 66.

14. *Зюзин Б. Ф.*, *Жигульская А. И.*, *Юдин С. А.* Механика торфа и торфяной залежи. — Тверь: ТГТУ, 2020. — 112 с.

15. *Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H.* Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils // Silva Fennica. 2019, vol. 53, pp. 1 — 24. DOI: 10.14214/sf.10134.

16. *Wong Y. C. D.*, *Lim H. H.* S., *Chan W. Q.* An assessment of land vehicles' trafficability // DSTA Horizons. 2016, pp. 54 — 63.

17. *Šabartová Z., Lindroth P., Strömberg A. B., Patriksson M.* An optimization model for truck tyres selection / Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Optimization 2014, Lisbon, Portugal. 2014, pp. 561 — 566.

18. *Jones M., Arp P.* Soil trafficability forecasting // Open Journal of Forestry. 2019, vol. 9, pp. 296 — 322. DOI: 10.4236/ojf.2019.94017.

19. *Михайлов А. В.* Открытая разработка хранилища лигнина // Записки Горного института. — 2017. — Т. 223. — С. 44 — 50. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.44.

20. *Priddy J. D.*, *Willoughby W. E.* Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure // Journal of Terramechanics. 2006, vol. 43, no. 2, pp. 85 — 96.

21. *Poltorak B. J.*, *Labelle E. R.*, *Jaeger D.* Soil displacement during ground-based mechanized forest operations using mixed-wood brush mats // Soil and Tillage Research. 2018, vol. 179, pp. 96 — 104. DOI: 10.1016/j.still.2018.02.005.

22. *Ким Ю. А.*, *Бобрович В. А.*, *Войтеховский Б. В.*, *Исаченков В. С.* Влияние величины давления воздуха в шинах колес на геометрические параметры пятна контакта при взаимодействии с опорной поверхностью // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. — 2018. — № 2(210). — С. 308 — 312.

23. *Kolář P.* A joint model of heavy truck, tyres, and operating environment for tyres selection. Master's thesis, Sweden, Gothenburg, Chalmers University of Technology, 2015, 83 p.

24. *Яблонев А. Л.*, *Дорогов О. В.* Обоснование параметров пневмоколесного хода пассивных прицепных машин для транспортирования фрезерного торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 7. — С. 174 — 177.

25. *Caterpillar* Performance. Handbook Edition 49. Caterpillar, Peoria, Illinois, U.S.A. 2019. 2438 p.

26. *Joshi A. K., Dandekar I. A., Gaikwad M. V., Harge C. G.* Pugh matrix and kano model-the significant techniques for customer's survey // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2019, vol. 9, no. 6, pp. 53 — 55.

27. *Shoop S. A.* Terrain characterization for trafficability, U.S. Army cold regions research and engineering laboratory // CRREL Report. 1993, no. 93-6, 30 p. ГИАБ

REFERENCES

1. Burt C., Caccetta L. Equipment selection for surface mining: a review. *Journal Interfaces Archive*. 2014, vol. 44, no. 2, pp. 143 — 162.

2. Mikhailov A. V., Garmaev O. Z., Garifullin D. R., Kazakov Y. A. A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, article 012086. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012086.

3. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 228 — 233. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.

4. Fomin S. I., Faul' A. A., Ponomaryov A. I. Open cast technological system with in-pit fully mobile crushing reliability avaluation. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 190, pp. 51 — 56. [In Russ].

5. Faul' A. A. *Opredelenie parametrov i pokazateley otkrytoy razrabotki mestorozhdeniy nerudnykh stroitel'nykh materialov s ispol'zovaniem mobil'nykh drobil'nykh kompleksov* [Determination of parameters and indicators of open-cast mining of deposits of non-metallic building materials using mobile crushing complexes], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2012, 20 p.

6. Lapshin N. S. *Obosnovanie organizatsionno-tekhnicheskikh metodov otkrytoy razrabotki peschano-graviynykh mestorozhdeniy s ispol'zovaniem mobil'nykh drobil'no-sortirovochnykh kompleksov* [Justification of organizational and technical methods of opencast development of sand and gravel deposits using mobile crushing and screening complexes], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2012, 20 p.

7. Litvinenko V. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Chemie der Erde*. 2020, vol. 80, no. 3, article 125652. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125652.

8. Zyuzin B. F., Zhigul'skaya A. I., Yudin S. A. *Distortnost' v metodologii vzaimodeystviya tekhnologicheskikh mashin s torfyanoy zalezh'yu* [Distortion in the methodology of interaction of technological machines with peat deposit], Tver, TGTU, 2021, 168 p.

10. Kuvshinkin S. Y., Ivanova P. V. Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, no. 378, pp. 1 — 5.

11. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Digital technologies in modeling and design of mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, no. 1753, pp. 1 — 6.

12. Fomin V. M. *Avtomobili. Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv avtomobiley* [Automobiles. Theory of vehicle performance], Moscow, RUDN, 2008, 112 p.

13. Taghavifar H., Mardani A. Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2014, no. 13, pp. 57 — 66.

14. Zyuzin B. F., Zhigul'skaya A. I., Yudin S. A. *Mekhanika torfa i torfyanoy zalezhi* [Mechanics of peat and peat deposit], Tver, TGTU, 2020, 112 p.

15. Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H. Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils. *Silva Fennica*. 2019, vol. 53, pp. 1 — 24. DOI: 10.14214/sf.10134.

16. Wong Y. C. D., Lim H. H. S., Chan W. Q. *An assessment of land vehicles' trafficability*. DSTA Horizons. 2016, pp. 54 — 63.

17. Šabartová Z., Lindroth P., Strömberg A. B., Patriksson M. An optimization model for truck tyres selection. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Optimization* 2014, Lisbon, Portugal. 2014, pp. 561 — 566.

18. Jones M., Arp P. Soil trafficability forecasting. *Open Journal of Forestry*. 2019, vol. 9, pp. 296 — 322. DOI: 10.4236/ojf.2019.94017.

19. Mikhailov A. V. Open-pit mining of lignin waste storage. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 223, pp. 44 — 50. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.44.

20. Priddy J. D., Willoughby W. E. Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure. *Journal of Terramechanics*. 2006, vol. 43, no. 2, pp. 85 — 96.

21. Poltorak B. J., Labelle E. R., Jaeger D. Soil displacement during ground-based mechanized forest operations using mixed-wood brush mats. *Soil and Tillage Research*. 2018, vol. 179, pp. 96 — 104. DOI: 10.1016/j.still.2018.02.005.

22. Kim Yu. A., Bobrovich V. A., Voitekhovskii B. V., Isachenkov V. S. Influence of the air pressure value in the tires of the wheels on the geometric parameters of the contact patch when interacting with the supporting surface. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov*. 2018, no. 2(210), pp. 308 — 312. [In Russ].

23. Kolář P. *A joint model of heavy truck, tyres, and operating environment for tyres selection*. Master's thesis, Sweden, Gothenburg, Chalmers University of Technology, 2015, 83 p.

24. Yablonev A. L., Dorogov O. V. Justification of the parameters of pneumatic wheel running passive trailed machines for transportation of milled peat. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 7, pp. 174 — 177. [In Russ].

25. *Caterpillar Performance*. Handbook Edition 49. Caterpillar, Peoria, Illinois, U.S.A. 2019. 2438 p.

26. Joshi A. K., Dandekar I. A., Gaikwad M. V., Harge C. G. Pugh matrix and kano model-the significant techniques for customer's survey. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2019, vol. 9, no. 6, pp. 53 — 55.

27. Shoop S. A. Terrain characterization for trafficability, U.S. Army cold regions research and engineering laboratory. *CRREL Report*. 1993, no. 93-6, 30 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михайлов Александр Викторович[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: Mikhayov_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0516-7737,
Казаков Юрий Алексеевич[1] — аспирант,
e-mail: s185048@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7040-5412,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Казаков Ю.А., e-mail: s185048@stud.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Mikhailov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: Mikhaylov_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0516-7737,
Yu.A. Kazakov[1], Graduate Student,
e-mail: s185048@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7040-5412,
[1] Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: Yu.A. Kazakov, e-mail: s185048@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 17.03.2022; получена после рецензии 15.04.2022; принята к печати 10.07.2022.
Received by the editors 17.03.2022; received after the review 15.04.2022; accepted for printing 10.07.2022.