

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНУСНОГО ИНДЕКСА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАБОЛОЧЕННОГО ГРУНТА

М.Н. Дмитриева¹

доктор технических наук, профессор **И.В. Григорьев²**

В.А. Лухминский³

Д.П. Казаков³

кандидат технических наук **А.М. Хахина⁴**

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

4 – НИУ «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Цель исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, – дополнить научное описание свойств слабонесущих заболоченных поверхностей движения лесных машин. В ходе экспериментов ставились следующие задачи: выявить взаимосвязи физико-механических свойств слабонесущего грунта; проверить возможность выразить удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль сдвига грунта через его модуль деформации; исследовать взаимосвязь конусного индекса и физико-механических свойств слабонесущего грунта. Опыты проводились на территории, арендуемой предприятием ООО «Купеческий дом» (г. Псков), летом и осенью 2016 г. Для определения угла внутреннего трения, удельного сцепления, модуля деформации, модуля сдвига и конусного индекса использованы методики, регламентированные соответствующими стандартами. В статье представлены основные статистические данные по свойствам исследованных образцов слабонесущего грунта и сведения о корреляции значений исследованных свойств слабонесущего грунта. По результатам исследования выявлены тесные связи удельного сцепления, угла внутреннего трения, модуля сдвига и конусного индекса с модулем деформации слабонесущего грунта. По результатам обработки опытных данных и значениям коэффициентов детерминации формул, полученных для исследованных свойств слабонесущего грунта, подтверждено, что значения удельного сцепления, угла внутреннего трения, модуля сдвига и конусного индекса на практике с удовлетворительной точностью выражаются через модуль деформации. Выполнено сравнение расчётных значений конусного индекса по известным ранее теоретическим формулам и экспериментальных значений, замеренных при проведении экспериментов. Показано, что результаты сравнения позволяют настаивать на удовлетворительной точности теоретического подхода к определению конусного индекса слабонесущего грунта.

Ключевые слова: конусный индекс, физико-механические свойства, зондирование, слабонесущий грунт, заболоченный грунт.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE CONE INDEX AND PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF SWAMPY GROUND

M.N. Dmitrieva¹

DSc (Engineering), Professor I.V. Grigoryev²

V.A. Lukhminsky³

D.P. Kazakov³

PhD (Engineering) A.M. Khakhina⁴

1 – FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov»

2 – FSBEI HE «Yakut State Agricultural Academy», Yakutsk, Russian Federation

3 – FSBEI HE "Saint-Petersburg State Forest Technical University under name of S.M Kirov", Saint-Petersburg, Russian Federation

4 – SRU «Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University», Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract

The aim of the research, the results of which are set forth in this article, is to supplement the scientific description of the properties of the weakly bearing swampy surfaces of forest machinery movement. In the course of the experiments, the following tasks were set: to reveal the interrelationships of the physical and mechanical properties of weak soil; to test the possibility of expressing the specific cohesion, the angle of internal friction and the shear modulus through its modulus of deformation; to investigate the relationship between the cone index and physical and mechanical properties of weak soil. The experiments were carried out on the territory, leased by the LLC "Kupechesky Dom" (Pskov) in summer and autumn of 2016. To determine the angle of internal friction, specific adhesion, modulus of deformation, shear modulus and cone index, methods that were regulated by the relevant standards were used. The article presents the main statistical data on the properties of samples of weak soil and information on the correlation of values of properties of weak ground. Based on the results of the study, close bonds of specific adhesion, the angle of internal friction, shear modulus and cone index with the modulus of deformation of weak soil were revealed. Based on the results of experimental data processing and values of the coefficients of determination of the formulas obtained for the properties of weak soil, it was confirmed that the values of specific adhesion, angle of internal friction, shear modulus and cone index are in practice expressed in terms of the deformation modulus with satisfactory accuracy. The calculated values of the conic index are compared with the previously known theoretical formulas and the experimental values measured during the experiments. It is shown that the results of the comparison make it possible to insist on the satisfactory accuracy of the theoretical approach to the determination of cone index of weakly bearing soil.

Keywords: cone index, physical and mechanical properties, probing, weak soil, swampy soil.

Лесные машины работают в разнообразных почвенно-грунтовых условиях, в том числе – на заболоченных грунтах. Для разработки и реализации математических моделей, прогнозирующих показатели взаимодействия движителей машин со слабонесущими опорными поверхностями, необходимы сведения об их свойствах. Ранее предложены теоретические зависимости, позволяющие рассчитать глубину колеи и тягово-сцепные свойства колесных лесных машин, использующие модуль деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль сдвига в качестве характеристик грунта, например [1], [4], [5]. Кроме того, известны

формулы для расчета показателей взаимодействия движителей с опорной поверхностью, в которых в качестве основного параметра грунта используется показатель сопротивления грунта вдавливаю конического индентора [3], [7], [8], [10], [14] – конусный индекс, определяемый по методике [9]. Цель исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, – дополнить научное описание свойств слабонесущих заболоченных поверхностей движения лесных машин. В ходе наших экспериментов ставились следующие задачи:

1. Выявить взаимосвязи физико-механических свойств слабонесущего грунта, проверить

возможность выразить удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль сдвига грунта через его модуль деформации;

2. Исследовать взаимосвязь конусного индекса и физико-механических свойств слабонесущего грунта.

Для определения угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C почвогрунта проводили испытание образцов грунта методом одноплоскостного среза. Испытания проводили в соответствии с методикой [2]. Модуль деформации E и модуль сдвига G – также по методике [2].

В непосредственной близости от мест отбора проб грунта для исследования физико-механических свойств проводилось зондирование грунта. Для зондирования использован экспериментальный конусный пенетrometer, его геометрические параметры: диаметр основания конуса $d = 35,7$ мм, длина конической части пенетromетра $L = 31$ мм, угол при вершине конуса $\alpha = 30^\circ$. Пенетromетр оснащен электронным датчиком давления ДОС-3-И. Прибор и методика его использования апробированы в работах [5], [12]. Экспериментальные значения конусного индекса CI получали в соответствии с методикой, изложенной в работах [5], [12], вдавливание осуществлялось на глубину $Z = 2L$. Фотография прибора и измерительной аппаратуры представлена на рис. 1.

Опыты проводились на территории, арендуемой предприятием ООО «Купеческий дом» (г. Псков), летом и осенью 2016 г.

Основные статистические данные (средние значения исследуемых величин m , среднеквадратические отклонения для выборок S , требуемые числа наблюдений $[n]$ при показателе точности $p = 0,05$) по выборкам исследованных экспериментальных величин представлены в табл. 1.

Сведения о корреляции значений исследованных свойств слабонесущего грунта представлены в табл. 2.



Рис. 1. Измерительная аппаратура экспериментального конусного пенетromетра

Таблица 1
Основные статистические данные по свойствам исследованных образцов слабонесущего грунта

Показатель	E	C	φ	G	CI
m	0,555	18,643	14,204	0,676	0,477
S	0,262	8,514	4,093	0,206	0,254
$[n]$	151	141	56	63	193

Таблица 2

Коэффициенты корреляции исследованных свойств слабонесущего грунта

	E	C	φ	G	CI
E	-	0,9307	0,8246	0,8958	0,8854
C	0,9307	-	0,7704	0,8118	0,8907
φ	0,8246	0,7704	-	0,7322	0,8449
G	0,8958	0,8118	0,7322	-	0,8094
CI	0,8854	0,8907	0,8449	0,8094	-

Отметим тесные связи удельного сцепления, угла внутреннего трения, модуля сдвига и конусного индекса с модулем деформации слабонесущего грунта. Графически связи представлены на рис. 2 – 5.

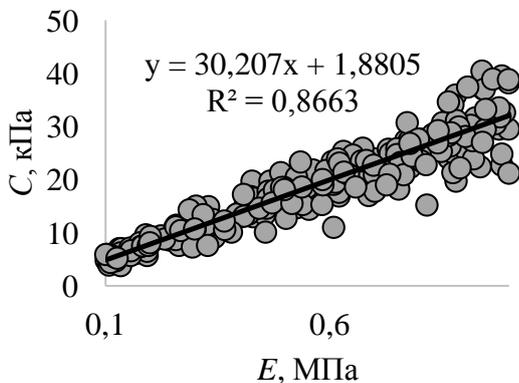


Рис. 2. Зависимость удельного сцепления от модуля деформации слабонесущего грунта

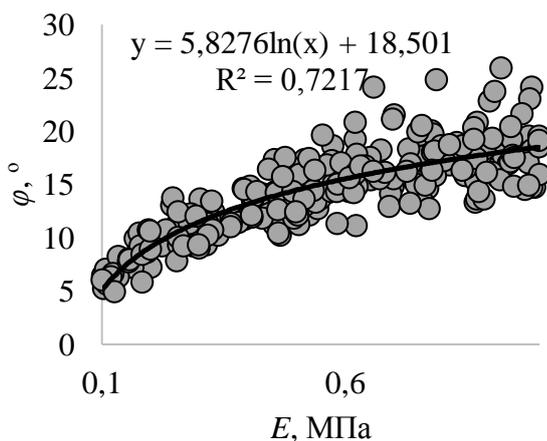


Рис. 3. Зависимость угла внутреннего трения от модуля деформации слабонесущего грунта

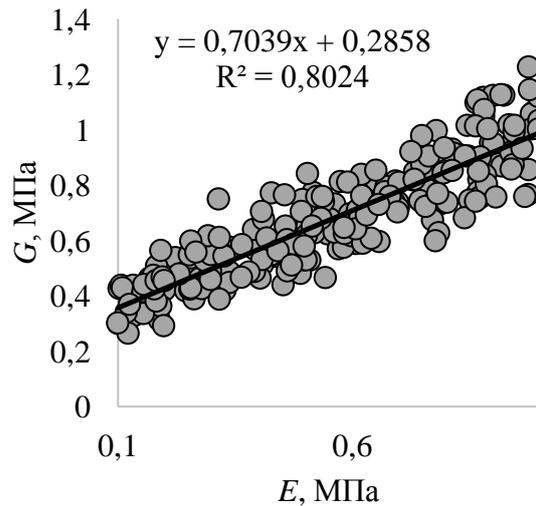


Рис. 4. Зависимость модуля сдвига от модуля деформации слабонесущего грунта

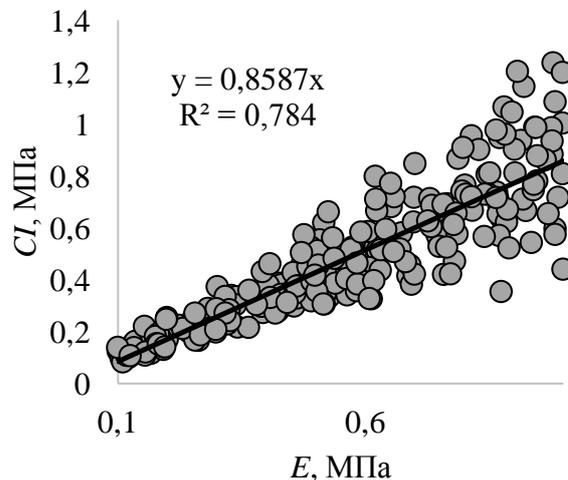


Рис. 5. Зависимость конусного индекса от модуля деформации слабонесущего грунта

Величины C [кПа], φ [°], G [МПа], CI [МПа] можно с удовлетворительной точностью выразить через модуль деформации E [МПа] при помощи следующих зависимостей:

$$C = 30,207 E + 1,8805 \quad (R^2 = 0,8663) \quad (1)$$

$$\varphi = 5,8276 \ln E + 18,501 \quad (R^2 = 0,7217) \quad (2)$$

$$G = 0,7039 E + 0,2858 \quad (R^2 = 0,8024) \quad (3)$$

$$CI = 0,8587 E \quad (R^2 = 0,7840) \quad (4)$$

По значениям коэффициентов детерминации формул (1) – (4) можем заключить, что значения физико-механических свойств и конусного ин-

декса заболоченного грунта с удовлетворительной точностью выражаются через модуль деформации.

Известно, что конусный индекс грунта может быть рассчитан по теоретической формуле [6], [11], [13]

$$CI = -C \cot \varphi + \Theta \cdot \frac{24 G^m (\tan \alpha + \tan \varphi)(1 + \sin \varphi) \tan \alpha}{d^2 \gamma^2 (m-2)(m-3)(3 - \sin \varphi) \tan^3 \varphi}$$

$$\Theta = \{C + (Z + L) \cdot \gamma \tan \varphi\}^{3-m} -$$

$$- \{C + Z \cdot \gamma \tan \varphi\}^{2-m} \cdot \{C + (Z + 3L - Lm) \cdot \gamma \tan \varphi\} \quad (5)$$

$$m = \frac{4 \sin \varphi}{3(1 + \sin \varphi)},$$

где γ – объемный вес грунта.

Значение объемного веса практически не влияет на результаты расчета конусного индекса по формуле (5), что было доказано ранее в [6], поэтому при расчетах принимали $\gamma = 7 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$.

Результаты расчётов конусного индекса по формулам (5), (1) – (3) сопоставлены с экспериментальными значениями конусного индекса на рис. 6.

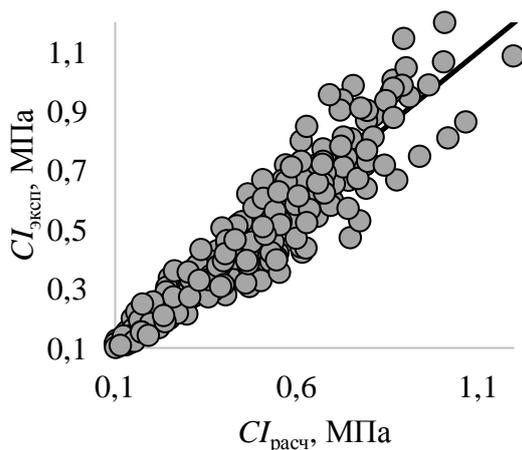


Рис. 6. Сравнение расчётных и экспериментальных значений конусного индекса слабонесущего грунта

Коэффициент корреляции расчётных значений конусного индекса по формулам (5), (1) – (3) и экспериментальных значений $r = 0,9395$.

На рис. 7 сопоставлены результаты расчёта конусного индекса по теоретической формуле (5) и экспериментальных значений конусного индекса. Коэффициент детерминации R^2 при аппроксимации экспериментальных данных теоретической формулой (5) составляет 0,7752, что позволяет настаивать

на удовлетворительной точности теоретической зависимости (5) при расчете конусного индекса слабонесущего грунта.

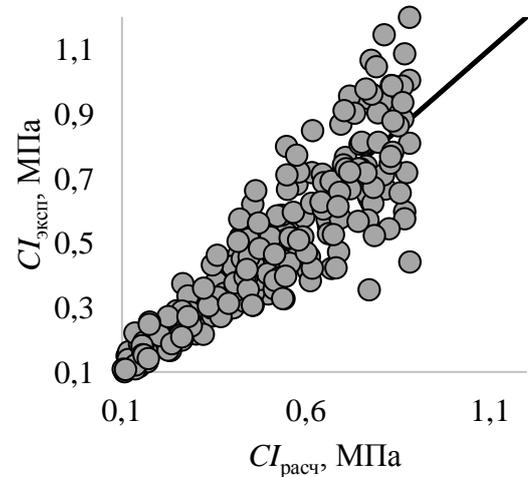


Рис. 7. Сравнение расчётных и экспериментальных значений конусного индекса слабонесущего грунта

Резюмируем основные результаты выполненных экспериментов:

1. Выявлены тесные связи удельного сцепления, угла внутреннего трения, модуля сдвига и конусного индекса с модулем деформации слабонесущего грунта. Графически связи представлены на рис. 2 – 5, сведения о корреляции свойств слабонесущего грунта представлены в табл. 2.

2. По результатам обработки опытных данных и значениям коэффициентов детерминации формул, полученных для исследованных свойств слабонесущего грунта, можем заключить, что их значения удельного сцепления, угла внутреннего трения, модуля сдвига и конусного индекса с удовлетворительной точностью выражаются через модуль деформации. Зависимости представлены формулами (1) – (4).

Коэффициент корреляции расчётных значений конусного индекса по формулам (5), (1) – (3) и экспериментальных значений составляет 0,9395, коэффициент детерминации при аппроксимации экспериментальных данных формулой (5), полученной теоретически, составляет 0,7752, что позволяет настаивать на удовлетворительной точности теоретического подхода к определению конусного индекса слабонесущего грунта.

Библиографический список

1. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных машин [Текст] / И. В. Григорьев [и др.] // Вестник московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2014. – № 2. – С. 36-41.
2. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-12248-2010>.
3. Донцов, И. Е. Моделирование движения навесных орудий по глубине. математическая модель колебаний [Текст] / И. Е. Донцов, И. М. Бартенев, М. Н. Лысыч // Лесотехнический журнал. – 2017. – №1 (25). – С. 176-185.
4. Пошарников, Ф. В. Совершенствование технических средств для лесных питомников [Текст] / Ф. В. Пошарников, В. С. Попов, В. Г. Свиридов // Лесотехнический журнал. – 2011. – № 4. – С. 110-117.
5. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег [Текст] / С. Е. Рудов, Е. Г. Хитров, М. Е. Рудов, В. В. Устинов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 1 (12). – С. 223-228.
6. Прогрессивные ресурсосберегающие технологии и технические средства для лесовосстановления [Текст] / Л. Т. Свиридов [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2007. – № 17. – С. 230-234.
7. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учетом деформации почвогрунта [Текст] / Е. Г. Хитров [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2015. – Т. 19. – № 6. – С. 87-90.
8. Хитров, Е. Г. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта [Текст] : научное издание / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, А. М. Хахина. – СПб., 2015. – 146 с.
9. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта [Текст] / Е. Г. Хитров, Г. В. Григорьев, И. Н. Дмитриева, Д. А. Ильюшенко // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 4 (24). – С. 127-131.
10. Ashmore, C. An empirical equation for predicting tractive performance of log-skidder tires [Text] / C. Ashmore, C. Burt, J. Turner // Transactions of the ASAE. – 1987. – No. 30(5). – P. 1231-1236.
11. Dwyer, M. J. Tractive performance of a wide, low-pressure tyre compared with conventional tractor drive tyres [Text] / M. J. Dwyer // Journal of terramechanics. – 1987. – No. 24(3). – P. 227-234.
12. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing – Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test [Text].
13. Maclaurin, E. B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres [Text] / E. B. Maclaurin // Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, August 20-24, 1990. – 1990. – Vol. I. – P. 177-186.
14. Rohani, B. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil [Text] / B. Rohani, G. Y. Baladi. – U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. – 41 p.
15. Saarilahti, M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors [Text] / M. Saarilahti. – University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. – 28 p.
16. Vesic, A. S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass [Text] / A. S. Vesic // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. – 1972. – № 98. – P. 113-123.
17. Wismer R. D. Off-road traction prediction for wheeled vehicles [Text] / R. D. Wismer, H. J. Luth // Transaction ASAE. – 1973. – No. 17(1). – P. 8-10, 14.

References

1. *Issledovanie koeficienta soprotivleniya peredvizheniju kolesnyh lesnyh mashin* [Studies of rolling resistance coefficient of wheeled forestry machines] / I. V. Grigor'ev [et al.] // *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik* [Herald MSFU – Forestry Gazette]. – 2014. – No. S2. – P. 36-41.
2. *GOST 12248-2010 Soils. Laboratory methods for determining the strength and strain characteristics.* – Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-12248-2010> (in Russian).
3. Doncov I. E. *Modelirovanie dvizheniya navesnih orudii po glubine. matematicheskaya model kolebanii* [Modeling of the motion of mounted equipment in depth. a mathematical model of oscillations] / I. E. Doncov, I. M. Bartenev, M. N. Lisich // *Lesotekhnicheskii jurnal.* – 2017. – № 1 (25). – P. 176-185.
4. Posharnikov F. V. *Sovershenstvovanie tehniceskikh sredstv dlya lesnyh pitomnikov* [Improvement of technical equipment for forest nurseries] / F. V. Posharnikov, V. S. Popov, V. G. Sviridov // *Lesotekhnicheskii jurnal* [Forestry Journal]. – 2011. – № 4. – P. 110-117.
5. *Raschet tzhagovyh i scepnyh svoystv kolesnogo skiddera s ispol'zovaniem dannyh zarubezhnyh kolleg* [Calculation the tractive performance of a wheeled skidder using foreign colleagues data] / S. E. Rudov, E. G. Khitrov, M. E. Rudov, V. V. Ustinov // *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current research trends of the XXI century: Theory and Practice]. – 2015. – T. 3. – No. 1 (12). – P. 223-228.
6. *Progressivnie resursosberegayuschie tehnologii i tehnicheskie sredstva dlya lesovossta_novleniya* [Progressive resource-saving technologies and equipment for reforestation] / L. T. Sviridov [et al.] // *Aktualnie problemi lesnogo kompleksa* [Actual problems of forestry complex]. – 2007. – № 17. – P. 230-234.
7. *Model' dlja ocenki radial'noj deformacii kolesa lesnoj mashiny s uchetom deformacii pochvogrunta* [Model to assess the tyre deflection of the wheeled forest machine regarding the forest soil strain] / E. G. Khitrov [et al.] // *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik* [Herald MSFU – Forestry Gazette]. – 2015. – No. 6(19). – P. 87-90.
8. Khitrov E. G. *Povysheniej effektivnosti trelevki obosnovaniem pokazatelej raboty lesnyh mashin pri operativnom kontrole svoystv pochvogrunta* [Improving performance of forestry machines with in situ control forest soils' properties] / E. G. Khitrov, I. V. Grigor'ev, A. M. Khakhina. – Saint-Petersburg, 2015. – 146 p.
9. *Raschet konusnogo indeksa po velichine modulja deformacii lesnogo pochvogrunta* [Calculation of the cone index value based on modulus of deformation of the forest soil] / E. G. Khitrov, G. V. Grigor'ev, I. N. Dmitrieva, D. A. Il'jushenko // *Sistemy. Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technologies]. – 2014. – No. 4 (24). – P. 127-131.
10. Ashmore, C. An empirical equation for predicting tractive performance of log-skidder tires [Text] / C. Ashmore, C. Burt, J. Turner // *Transactions of the ASAE.* – 1987. – No. 30(5). – P. 1231-1236.
11. Dwyer, M. J. Tractive performance of a wide, low-pressure tyre compared with conventional tractor drive tyres [Text] / M. J. Dwyer // *Journal of terramechanics.* – 1987. – No. 24(3). – P. 227-234.
12. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing – Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test [Text].
13. Maclaurin, E. B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres [Text] / E. B. Maclaurin // *Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, August 20-24, 1990.* – 1990. – Vol. I. – P. 177-186.
14. Rohani, B. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil [Text] / B. Rohani, G. Y. Baladi. – U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. – 41 p.
15. Saarihahti, M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors [Text] / M. Saarihahti. – University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. – 28 p.
16. Vesic, A. S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass [Text] / A. S. Vesic // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.* – 1972. – № 98. – P. 113-123.
17. Wismer R. D. Off-road traction prediction for wheeled vehicles [Text] / R. D. Wismer, H. J. Luth // *Transaction ASAE.* – 1973. – No. 17(1). – P. 8-10, 14.

Сведения об авторах

Дмитриева Мария Николаевна – аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: maryndmitrieva@gmail.com

Григорьев Игорь Владиславович – профессор кафедры природообустройства ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: silver73@inbox.ru

Лухминский Владислав Алексеевич – соискатель кафедры математических методов в управлении ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: vlad1112@yandex.ru

Казakov Денис Павлович – аспирант кафедры математических методов в управлении ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: kdp.manage@gmail.com

Хахина Анна Михайловна – доцент кафедры «Компьютерные интеллектуальные системы» НИУ «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кандидат технических наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: hahin@mail.ru

Information about authors

Dmitrieva Maria Nikolaevna – Post-graduate Student of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: maryndmitrieva@gmail.com

Grigorev Igor Vladislavovich – Professor, Department of Environmental engineering Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Yakutsk state agricultural Academy», Yakutsk, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru

Lukhminskiy Vladislav Alekseevich – Applicant of Department of mathematical methods in management of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov», St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: vlad1112@yandex.ru

Kazakov Denis Pavlovich – Post-graduate Student of Department of mathematical methods in management of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov», St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: kdp.manage@gmail.com

Khakhina Anna Mikhailovna – Associate Professor of «Computer intellectual systems» Department of National Research University «Saint Petersburg State Polytechnic University», PhD, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: hahin@mail.ru