

**АНТОНИНА ИВАНОВНА НИКИФОРОВА**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
*tlzp@inbox.ru*

**ЕГОР ГЕРМАНОВИЧ ХИТРОВ**

аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
*yegorkhitrov@gmail.com*

**АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ ПЕЛЫМСКИЙ**

аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
*tlzp@inbox.ru*

**ОЛЬГА ИВАНОВНА ГРИГОРЬЕВА**

доцент кафедры лесоводства, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
*tlzp@inbox.ru*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСАДКИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ПО ДВУСЛОЙНОМУ ОСНОВАНИЮ

Известен способ укрепления трелевочных волоков порубочными остатками с целью снижения экологического ущерба почвогрунту лесосеки, вызванного движением лесозаготовительной техники. Однако известные модели взаимодействия машины и лесного почвогрунта не достаточно полно раскрывают влияние различия физико-механических свойств слоя порубочных остатков и слоя грунта лесосеки, а также их изменение, вызванное уплотнением после прохода машины. В статье рассмотрено взаимодействие лесозаготовительной машины с основанием, состоящим из двух слоев: слоя измельченных порубочных остатков (верхний слой) и слоя грунта лесосеки (нижний слой). Предложена модель колеообразования, в явном виде учитывающая влияние различия физико-механических характеристик слоев основания, а также изменение свойств грунта после прохода машины. Рассмотрен алгоритм расчета глубины колеи при многократном прохождении техники по участку трассы и пример расчета глубины колеи после 25 проходов машины по трассе при варьировании удельного давления со стороны машины на основание и толщины слоя уложенных на него порубочных остатков.

Ключевые слова: грунт, колеообразование, циклическая нагрузка, многослойное основание, порубочные остатки

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в России все большее внимание уделяется экологическому аспекту проведения лесозаготовок [2]. Негативное влияние лесозаготовительной техники на лесной почвогрунт широко известно: переуплотнение, срез слоев почвогрунта лесосеки вызывают заметное снижение его качества с точки зрения последующего лесовосстановления. Сохранение плодородия лесных почв является одним из магистральных направлений научно-технического прогресса в лесозаготовительном производстве [2].

Одним из путей решения задачи снижения экологического ущерба лесу, вызванного движением лесозаготовительной техники при осуществлении заготовки древесины, является укрепление трелевочных волоков лесосечными

отходами. Этот способ представляется более целесообразным в свете необходимости утилизации отходов лесозаготовительного производства, что также является одной из важнейших практических задач отрасли [3].

Научно обоснованное планирование организационно-технических мероприятий по укреплению трелевочных волоков лесосек невозможно без четкого описания процесса взаимодействия лесозаготовительных машин с лесным почвогрунтом, при этом одной из главных характеристик процесса является глубина образующейся при проходе машины колеи [2].

Как показал анализ литературных источников обозначенной тематики, вопрос колеообразования при многократном проходе машины по участку трассы изучен недостаточно [3], [4].

В частности, отсутствуют математические модели, в явном виде учитывающие неоднородность основания, по которому движется машина, что имеет место при работе на укрепленном порубочными остатками участке волока.

В связи с изложенным дальнейшие исследования процесса взаимодействия лесозаготовительной техники с многослойным основанием представляются актуальными. В статье рассматривается процесс колеообразования при циклическом воздействии лесозаготовительной техники на грунт лесосеки, укрепленный измельченными порубочными остатками.

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для определения глубины колеи, образующейся при проходе лесозаготовительной техники по волоку, укрепленному порубочными остатками, рассмотрим уплотнение двухслойного основания под действием сжимающей нагрузки.

Для построения модели вначале зададимся законом распределения вертикальных напряжений сжатия  $\sigma$  по глубине в следующем виде [1]:

$$\sigma(z) = p \frac{J}{1 + \left(\frac{z}{aD'}\right)^2}, \quad (1)$$

где параметры  $J, a, D'$  определяются известными выражениями:

$$= + \sqrt{\frac{0,03 + \frac{l}{b}}{0,6 + 0,43 \frac{l}{b}}}, \quad (2)$$

где  $F$  – площадь штампа,  $b$  – ширина штампа,  $l$  – длина штампа,  $H$  – толщина деформируемого слоя,  $p$  – давление со стороны машины на грунт.

Известно [1], что в общем виде осадка слоя грунта высотой  $z_2 - z_1$  ( $z$  – вертикальная координата сечения) от действия нормального давления  $\sigma(z)$  может быть найдена из следующего уравнения:

$$h_{\text{тл}} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sigma(z)}{E} dz. \quad (3)$$

Тогда, после подстановки (1) в (3) и интегрирования, для осадки можем записать:

$$h_{\text{тл}} = p \frac{JaD'}{E} \left[ \arctan\left(\frac{z_2}{aD'}\right) - \arctan\left(\frac{z_1}{aD'}\right) \right]. \quad (4)$$

Необходимо учесть, что по мере приближения действующих сжимающих напряжений к несущей способности грунта  $p_s$  вертикальное перемещение штампа-деформатора начинает интенсивно возрастать (потеря несущей способности) [1], поэтому для определения величины истинной деформации  $h_r$  используем формулу:

$$h_r = h_{\text{тл}} \frac{p_s}{p - p_s}. \quad (5)$$

При этом несущая способность основания определяется следующим образом:

$$p_s = \frac{1}{4} p_{s0} \pi^2 \arctan \frac{\pi(z_2 - z_1)}{2b}, \quad (6)$$

где  $p_{s0}$  находится из формулы [4]:

$$p_{s0} = J_1 X_1 + J_2 X_2 + X_3 h_r. \quad (7)$$

Значения параметров  $J_1, J_2$  для выражения (7) определяются так:

$$J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad J_2 = \frac{l + b}{l + 0,5b}. \quad (8)$$

Для расчета параметров  $X_1, X_2, X_3$  используют следующие формулы [1]:

$$X_1 = \frac{\gamma(1 - \text{III}^4)}{\text{III}^5}, \quad X_2 = \frac{2C_0(1 + \text{III}^2)}{\text{III}^3}, \quad (9)$$

$$X_3 = \frac{\gamma}{\text{III}^2}, \quad \text{III} = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \phi_0\right),$$

где  $\gamma$  – объемный вес грунта,  $C_0$  – внутреннее сцепление грунта,  $\phi_0$  – угол внутреннего трения грунта.

Поскольку рассматривается двуслойное основание (схема на рис. 1), в выражении (2) примем  $H = H_1 + H_2$ :

$$a = 1 + \frac{b}{H_1 + H_2}, \quad (10)$$

где  $H_1, H_2$  – толщина соответственно первого (верхнего) и второго слоев основания.

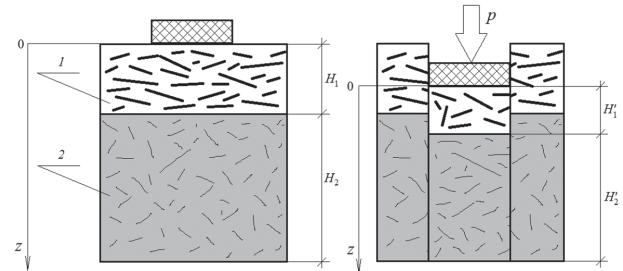


Рис. 1. Схема к определению осадки двуслойного основания: 1 – слой измельченных порубочных остатков, 2 – слой грунта лесосеки

В выражении (4) для пределов интегрирования нужно положить для первого слоя  $z_1 = 0$ ,  $z_2 = H_1 - h_{\text{тл1}}$ ; для второго слоя  $z_1 = H_1 - h_{\text{тл1}}$ ,  $z_2 = H_2 - h_{\text{тл2}}$ .

Тогда для линейной деформации первого слоя основания  $h_{\text{тл1}}$  можем записать:

$$h_{\text{тл1}} = p \frac{JaD'}{E_1} \arctan\left(\frac{H_1 - h_{\text{тл1}}}{aD'}\right). \quad (11)$$

Для линейной деформации второго слоя  $h_{\text{пл2}}$  также получим:

$$h_{\text{пл2}} = p \frac{JaD'}{E_2} \left[ \arctan \left( \frac{H_2 - h_{\text{пл2}}}{aD'} \right) - \arctan \left( \frac{H_1 - h_{\text{пл1}}}{aD'} \right) \right]. \quad (12)$$

Выражения для определения несущей способности слоев примут вид:  
для первого слоя:

$$p_{s1} = \frac{1}{4} p_{s01} \pi^2 \arctan \frac{\pi(H_1 - h_{\text{р1}})}{2b}, \quad (13)$$

для второго слоя:

$$p_{s2} = \frac{1}{4} p_{s02} \pi^2 \arctan \frac{\pi(H_1 - H_2 + h_{\text{р1}} - h_{\text{р2}})}{2b}. \quad (14)$$

Учтем также, что величина  $p_{s0}$  в уравнениях (13), (14) для слоев грунта определяется так:  
для первого слоя:

$$p_{s01} = J_1 X_{1(1)} + J_2 X_{2(1)} + X_{3(1)} h_{\text{р1}}, \quad (15)$$

для второго слоя:

$$p_{s02} = J_1 X_{1(2)} + J_2 X_{2(2)} + X_{3(2)} h_{\text{р2}}. \quad (16)$$

Параметры  $X_{1(1)}, X_{2(1)}, X_{3(1)}, X_{1(2)}, X_{2(2)}, X_{3(2)}$  определяются по формулам (9) после подстановки значений физико-механических характеристик слоев основания (нижний индекс в скобках соответствует номеру слоя).

Выразим  $h_{\text{пл}}$  через  $h_{\text{р}}$  из (5) отдельно для каждого слоя:

$$h_{\text{пл1}} = h_{\text{р1}} \frac{p - p_{s1}}{p_{s1}}, \quad h_{\text{пл2}} = h_{\text{р2}} \frac{p - p_{s2}}{p_{s2}}. \quad (17)$$

В итоге получим следующие уравнения:

$$h_{\text{р1}} \frac{p - p_{s1}}{p_{s1}} = p \frac{JaD'}{E_1} \arctan \left( \frac{H_1 - h_{\text{р1}} \frac{p - p_{s1}}{p_{s1}}}{aD'} \right), \quad (18)$$

$$h_{\text{р2}} \frac{p - p_{s2}}{p_{s2}} = p \frac{JaD'}{E_2} \left[ \arctan \left( \frac{H_2 - h_{\text{р2}} \frac{p - p_{s2}}{p_{s2}}}{aD'} \right) - \arctan \left( \frac{H_1 - h_{\text{р2}} \frac{p - p_{s2}}{p_{s2}}}{aD'} \right) \right]. \quad (19)$$

$$h_{\text{р}} = h_{\text{р1}} + h_{\text{р2}}. \quad (20)$$

Нетрудно увидеть, что трансцендентные уравнения (18), (19) содержат искомые величины  $h_{\text{р1}}, h_{\text{р2}}$  как в левой, так и в правой своей части, получить их решение в замкнутом виде не представляется возможным.

При многократном проходе лесозаготовительной техники по одному и тому же участку волока необходимо учесть изменение физико-механических свойств основания в результате предыдущего прохода машины [3].

В работе [5] предлагается определять модуль деформации  $E$ , внутреннее сцепление  $C_0$  и угол внутреннего трения  $\varphi_0$  грунта в зависимости от его коэффициента пористости  $e$ .

Для учета изменения пористости грунта после уплотнения примем зависимость физико-механических характеристик грунта в следующем виде:

$$E(e) = (A_{aE} + B_{aE} I_L) [(1 - \varepsilon)(e_{\text{max}} + 1) - 1]^{(A_{bE} + B_{bE} I_L)}, \quad (21)$$

$$C_0(e) = (A_{aC} + B_{aC} I_L) [(1 - \varepsilon)(e_{\text{max}} + 1) - 1]^{(A_{bC} + B_{bC} I_L)}, \quad (22)$$

$$\phi_0(e) = (A_{a\phi} + B_{a\phi} I_L) [(1 - \varepsilon)(e_{\text{max}} + 1) - 1]^{(A_{b\phi} + B_{b\phi} I_L)}, \quad (23)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация слоя грунта (2-й слой основания);  $e_{\text{max}}$  – коэффициент пористости, соответствующий максимально рыхлому состоянию грунта;  $A_{aE}, B_{aE}, A_{bE}, B_{bE}, A_{aC}, B_{aC}, A_{bC}, B_{bC}, A_{a\phi}, B_{a\phi}, A_{b\phi}, B_{b\phi}$  – некоторые постоянные для определенного типа грунта коэффициенты, определяемые экспериментально,  $I_L$  – показатель, характеризующий консистенцию грунта, определяемый, в свою очередь, так [5]:

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}, \quad (24)$$

где  $W$  – абсолютная влажность грунта,  $W_p$  – влажность грунта на границе пластиичности,  $W_L$  – влажность грунта на границе текучести.

После определения всех необходимых зависимостей можем перейти к расчетам глубины колеи, образующейся при многократном проходе лесозаготовительной техники по волоку, укрепленному слоем измельченных порубочных остатков.

Алгоритм расчетов следующий:

- задаемся типом грунта, его механическими свойствами (плотностью, пористостью, влажностью, влажностью на границе пластиичности и раскатывания, толщиной деформируемого слоя) по [5]. По уравнениям (21)–(23) определяем значение модуля деформации, угла внутреннего трения и величину внутреннего сцепления;
- задаемся свойствами слоя порубочных остатков, укладываемых на волок (толщиной слоя, углом внутреннего трения, сцеплением и модулем деформации);
- принимаем удельное давление на грунт, параметры деформатора – ширину и длину, площадь контакта;
- по формулам (8), (10), (2), (13)–(16), (9) рассчитываем величины, входящие в уравнения (18)–(19);

- далее производится численное решение уравнений (18)–(20) и с использованием найденных значений  $h_{r1}$ ,  $h_{r2}$ ,  $h_r$  вычисляется относительная деформация второго слоя основания (грунта) после первого прохода машины;
- с использованием выражений (21)–(23) определяются значения физико-механических параметров слоя грунта после первого прохода машины, при этом относительная деформация определяется с использованием рассчитанной величины  $h_{r1}$ ; полученные таким образом значения модуля деформации, угла внутреннего трения и внутреннего сцепления грунта используются при определении деформации слоя грунта после следующего прохода машины;
- свойства слоя порубочных остатков считаем постоянными, изменяется только его толщина (уменьшается после каждого прохода на величину  $h_{r1}$ ).

Для всех последующих проходов ход расчетов аналогичен описанному.

Как было отмечено ранее, уравнения (18)–(19) не имеют замкнутого решения, для их решения используются численные методы. Объем вычислений по описанному выше алгоритму значителен, на практике осуществление таких расчетов связано с существенными затратами времени, поэтому для проведения расчетов была составлена специальная программа в пакете смешанных вычислений *Maple*.

При проведении расчетов использовались следующие исходные данные:

$$F = 0,04 \text{ м}^2, b = 0,08 \text{ м}, l = 0,5 \text{ м}, H_1 = 0,2 \div 0,4 \text{ м}, H_2 = 0,75 \text{ м}, \rho_2^{(0)} = 1200 \text{ кг/м}^3, W_L = 50\%, W = 20\%, W_p = 40\%, E_1 = 6000 \text{ кПа}, \phi_{10} = 28^\circ, C_{10} = 0, p = 100 \div 250 \text{ кПа}, \text{грунт – суглинок.}$$

Определим, как изменяется осадка первого и второго слоев основания в зависимости от давления на грунт. Решая численно уравнения (18)–(20) при различных значениях давления  $p$ , получим графики, представленные на рис. 2.

Очевидно нелинейное влияние давления  $p$  на осадку первого и второго слоев основания. Осадка, начиная с давления  $p = 100$  кПа, интенсивно увеличивается, что качественно согласу-

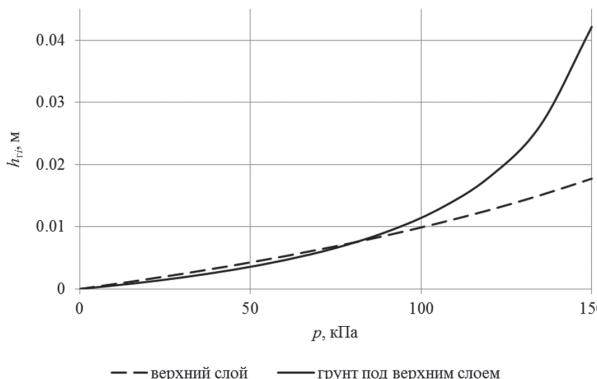


Рис. 2. Величина осадки слоев основания после однократного прохода машины ( $H_1 = 0,2$  м)

ется с физической картиной деформации грунта [1]: по мере приближения давления к несущей способности основания заметно влияние дополнительных касательных напряжений, происходит срез слоев грунта и осадка штампа растет непропорционально давлению.

Расчеты произведены при числе проходов  $N$ , равном 25, по трассе, основание которой представлено двумя слоями, в диапазоне давлений на грунт от 100 до 250 кН, результаты расчетов (глубина колеи, равная истинной деформации второго слоя основания  $h_{r2}$ ) представлены на графиках (рис. 3–5).

Рассмотренный в статье подход, на наш взгляд, позволит достаточно просто определять

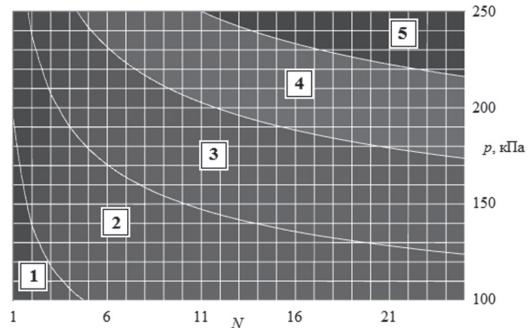


Рис. 3. Глубина колеи в зависимости от давления на грунт, см (толщина слоя порубочных остатков 0,2 м): 1 – 0–5 см, 2 – 5–10 см, 3 – 10–15 см, 4 – 15–20 см, 5 – 20–25 см

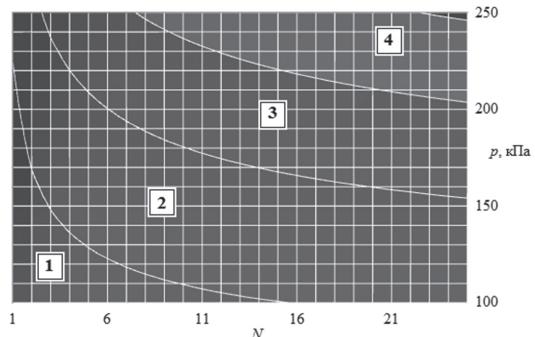


Рис. 4. Глубина колеи в зависимости от давления на грунт (толщина слоя порубочных остатков 0,3 м): 1 – 0–5 см, 2 – 5–10 см, 3 – 10–15 см, 4 – 15–20 см

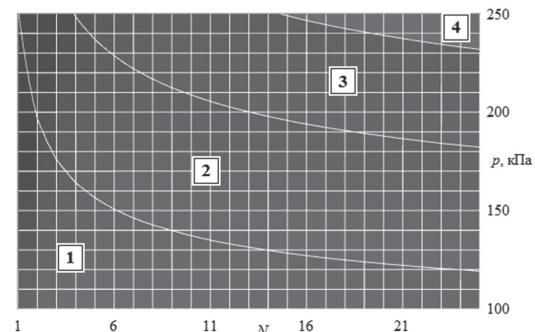


Рис. 5. Глубина колеи в зависимости от давления на грунт (толщина слоя порубочных остатков 0,4 м): 1 – 0–5 см, 2 – 5–10 см, 3 – 10–15 см, 4 – 15–20 см

глубину образующейся колеи при многократном прохождении техникой участка волока. При этом будет в явном виде учтено:

- влияние на колеообразование толщины слоя уложенных на волок измельченных порубочных остатков;

• влияние на глубину колеи изменения физико-механических свойств грунта после прохода машины.

Это, в свою очередь, позволит рассчитать достаточное для надежного укрепления волока количество укладываемых на него порубочных остатков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- А г е й к и н Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители: теория и расчет. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
- Г р и г о р ь е в И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: ЛТА, 2006. 236 с.
- Г р и г о р ь е в И. В., Жу к о в а А. И., Г р и г о р ь е в а О. И., И в а н о в А. В. Средошадящие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: ЛТА, 2008. 176 с.
- Г р и г о р ь е в И. В., Ш а п и р о В. Я., Р у д о в С. Е., Жу к о в а А. И. Модель процесса циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелевочному волоку // Вестник КрасГАУ. № 2. Красноярск, 2010. С. 8–14.
- Л а р и н В. В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: Дисс. ... д-ра техн. наук. М.: МГТУ им. Баумана, 2007. 419 с.

**Nikiforova A. I.**, Saint-Petersburg State Forest Technical University under name of S. M. Kirov  
(Saint-Petersburg, Russian Federation)

**Khitrov E. G.**, Saint-Petersburg State Forest Technical University under name of S. M. Kirov  
(Saint-Petersburg, Russian Federation)

**Pelymskiy A. A.**, Saint-Petersburg State Forest Technical University under name of S. M. Kirov  
(Saint-Petersburg, Russian Federation)

**Grigor'eva O. I.**, Saint-Petersburg State Forest Technical University under name of S. M. Kirov  
(Saint-Petersburg, Russian Federation)

#### TWO-LAYER GROUND DRAUGHT DEFINITION UNDER LOGGING MACHINE PASSAGE

A method to strengthen skid trails with logging waste to reduce environmental damage to soil and ground caused by the logging machine passage is well known. However, exciting models of machines and forest soils' interaction do not adequately reveal the impact of differences in physical and mechanical properties on the logging waste layer and cutting area of the soil layer. The depth of its change caused by compression after machine's passage is not disclosed either. The paper considers interaction between two layers: a layer of shredded logging waste (top layer) and the soil layer of cutting area (bottom layer). Further, we describe a model of rutting that explicitly takes into account the effect caused by differences in physical and mechanical characteristics of the base layers and the change in soil characteristics after machines' passage. The algorithm calculating the gauge depth after machines' multiple passages is described. The article ends with an example of the rut depth calculation model for 25 machine passages. The study involves cases with variable volumes of pressure exercised by logging machines on the base and thickness of the logging waste layers.

Key words: soil, rutting, cyclic loading, multi-layer ground, logging waste

#### REFERENCES

1. А г е й к и н Я. С. *Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli: teoriya i raschet* [Off-the-road wheeled and combined traction devices: Theory and Calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 184 p.
2. Г r i g o r ' e v I. V. *Snizhenie otritsateli nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh trelevochnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Mitigation of negative impacts on the soil caused by wheeled skidders by selecting modes of motion and process equipment]. SPb., LTA Publ., 2006. 236 p.
3. Г r i g o r ' e v I. V., Z h u k o v a A. I., Г r i g o r ' e v a O. I., I v a n o v A. V. *Sredoschadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyakh Severo-Zapadnogo regiona Rossii* [Eco efficient technologies of wood harvesting in the North-West region of the Russian Federation]. SPb., LTA Publ., 2008. 176 p.
4. Г r i g o r ' e v I. V., Sh a p i r o V. Ya., R u d o v S. E., Z h u k o v a A. I. The process of cyclic compaction in the bands adjacent to skid trails model [Model' protsessa tsiklicheskogo uplotneniya grunta v polosakh, prilegayushchikh k trelevochnomu voloku]. *Vestnik KrasGAU*. № 2. Krasnoyarsk, 2010. P. 8–14.
5. L a r i n V. V. *Metody prognozirovaniya i povysheniya opornoy prokhodimosti mnogoosnykh kolesnykh mashin na mestnosti: Diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Methods for predicting and improving multi-wheeled vehicles locomotion on the ground, Diss. doct. tehn. science]. Moscow, MGTU im. Baumana Publ., 2007. 419 p.

Поступила в редакцию 25.06.2013