

Исследование устойчивости краевой части массива оттаявшего почвогрунта на склонах при воздействии лесных машин и трелевочных систем

В.А. Каляшов^{1a}, В.Я. Шапиро^{2b}, И.В. Григорьев^{3c}, О.А. Куницкая^{3d}, О.И. Григорьева^{2e}, С.В. Герасимов^{4f}, Ю.М. Елизаров^{5g}

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

³ Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, 3, Якутск, Россия

⁴ Братский государственный университет, Макаренко, 40, Братск, Россия

⁵ ООО «Транссервис», Братск, Россия

^a vit832@yandex.ru, ^b shapiro54vlad@mail.ru, ^c silver73@inbox.ru, ^d ola.ola07@mail.ru, ^e grigoreva_o@list.ru, ^f sergey_bratsk@mail.ru, ^g transportgruz@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

^e <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-3841-3121>,

^g <https://orcid.org/000-0002-0565-1641>

Статья поступила 23.03.2021, принята 17.04.2021

В Российской Федерации в настоящее время значительный объем спелых и перестойных эксплуатационных лесов находится на территориях, неудобных для проведения лесозаготовок. Значительная часть таких лесов находится на склонах гор и сопок. Заготовка древесины при помощи бензиномоторных пил и канатных трелевочных установок в России уже не применяется. Для заготовки древесины в условиях склонов, например, на Дальнем Востоке используются машинные комплексы, включающие харвестер и форвардер, часто оснащенные специальными лебедками. Поведение массива почвогрунта под воздействием движителей лесных машин на склонах является практически не изученным вопросом, но весьма актуальным в свете особой ранимости таких лесов в экологическом плане. Прогнозирование результатов процессов образования колеи, которая в дальнейшем может стать очагом водной и ветровой эрозии, весьма важно для обеспечения экологической безопасности заготовки древесины современными машинными комплексами на склонах. В статье показано, что менее плотные и более оптимальные для лесовыращивания почвогрунты в большей степени подвержены разрушению и потере устойчивости при работе машин на склонах, тогда как участки волока с ухудшенной почвой более устойчивы к статической нагрузке от движителей лесных машин. Результаты выполненных исследований позволяют произвести оценку устойчивости краевой части массива оттаявшего почвогрунта при взаимодействии с ним движителей лесных машин на склонах. Установлено влияние основных факторов – физико-механических, природных и технических – на состояние устойчивости локальных участков волока. Полученные результаты обеспечивают более надежный прогноз показателей процесса образования колеи и сохранения плодородных участков почвогрунта при циклическом характере производства лесосечных работ в сложных сезонно-климатических условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова: леса на склонах, лесозаготовка, лесные машины, трелевочные системы, уплотнение почвогрунта, деформация почвогрунта.

Investigation of the stability of the edge part of the array of a thawing soil on the slopes when exposed to the operation of forest machines and skidding systems

V.A. Kalyashov^{1a}, V.J. Shapiro^{2b}, I.V. Grigorjev^{3c}, O.A. Kunitskaya^{3d}, O.I. Grigorjeva^{2e}, S.V.Gerasimov^{4f}, Yu. M. Elizarov^{5g}

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2-ya Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

³ Arctic State Agrotechnological University; 3 km, 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Russia

⁴ Bratsk State University, 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

⁵ LLC «Transservice», Bratsk, Russia

^a vit832@yandex.ru, ^b shapiro54vlad@mail.ru, ^c silver73@inbox.ru, ^d ola.ola07@mail.ru, ^e grigoreva_o@list.ru, ^f sergey_bratsk@mail.ru, ^g transportgruz@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

^e <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-3841-3121>,

^g <https://orcid.org/000-0002-0565-1641>

Received 23.03.2021 accepted 17.04.2021

In the Russian Federation, at present, a significant amount of mature and over-mature operational forests is located in areas that are inconvenient for logging. A significant part of these forests is located on the slopes of mountains and hills. Wood harvesting using gasoline-powered saws and rope skidders is no longer used in Russia. For harvesting wood in conditions of slopes, for example, in the Far East, machine complexes are used, including a harvester and a forwarder, often equipped with special winches. The behavior of the soil mass under the influence of forest machinery engines on the slopes is practically not studied, but it is very relevant, in the light of the special vulnerability of such forests in ecological terms. Predicting the results of the processes of track formation, which in the future may become a hotbed of water and wind erosion, is very important for ensuring the environmental safety of wood harvesting by modern machine complexes on the slopes. The article shows that less dense and more optimal for reforestation soils are more susceptible to destruction and loss of stability when working machines on the slopes, while the areas of the portage with degraded soil are more resistant to static load from the movers of forest machines. The results of the performed studies allow assessing the stability of the edge part of the thawed soil mass when the forest machinery movers interact with it on the slopes. The influence of the main factors, namely, physical and mechanical, natural and technical, on the stability of the local sections of the portage is established. The obtained results provide a more reliable forecast of the indicators of the process of track formation and the preservation of fertile soil areas with the cyclical nature of logging operations in the difficult seasonal and climatic conditions of the Far North.

Keywords: forests on slopes, logging, forestry machines, skidding systems, soil compaction, soil deformation.

Введение. При производстве лесосечных работ на склонах, особенно крутых и протяженных, называемых по классификации длинными, наряду со склонами с гребнями и раздробленными, при углах наклона, превышающих 20-25°, возникают особые условия взаимодействия движителей лесозаготовительных машин и трелевочных систем с массивом оттаявшего почвогрунта [1, 2, 3].

Как отмечалось в работах [4, 5], в силу водонепроницаемости границы вечной мерзлоты в межсезонные периоды работ при положительных температурах в вышележащем от указанной границы массиве оттаявшего почвогрунта концентрируется повышенная влажность ($W, \%$), которая существенно снижает такие параметры его прочности, как величина сцепления C и угол внутреннего трения φ , по сравнению с показателями C_c и φ_c , которые соответствуют сухому состоянию грунта ($W_c=15\%$):

$$C(W) = C_c \left\{ -0,785 \ln \left(\frac{W}{W_c} \right) + 1,0435 \right\}. \quad (1)$$

$$\varphi(W) = \varphi_c \left\{ -0,693 \ln \left(\frac{W}{W_c} \right) + 0,8741 \right\}. \quad (2)$$

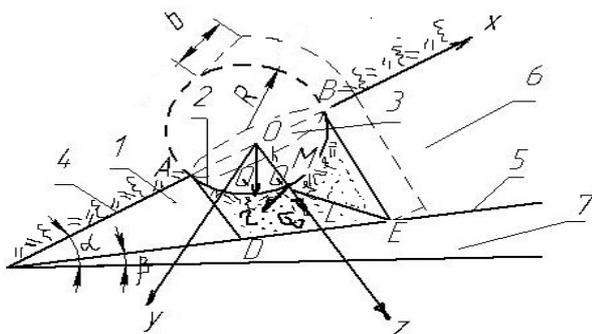


Рис. 1. Схема взаимодействия движителя лесозаготовительной машины или трелевочной системы с массивом грунта при работе на склоне

Условие потери устойчивости указанного участка почвогрунта содержит две составляющие. К первой необходимо отнести условие выполнения принятого критерия разрушения сдвигом во всех точках участка, тогда как ко второй – условие предельного равновесия между действующими силами сдвига от внешней статической нагрузки и тяжести и удерживающей силой нормальной реакции с учетом коэффициента внутреннего трения.

Для определения условия разрушения воспользуемся моделью сплошной среды с внутренним трением для оценки напряженного состояния грунта, которая рассмотрена в работе [6].

Под действием силы Q_z в точке M контактной площадки формируется начальное давление σ_0 , которое определяет радиальную (нормальную) σ_r и тангенциальную σ_θ (ортогональную σ_r) компоненты тензора напряжений в соответствии с соотношениями:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0}{\left(\frac{r}{a} \right)^n}; \quad \sigma_\theta = \gamma \sigma_r, \quad \gamma = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (3)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радиальная координата, γ – коэффициент бокового распора, ν – коэффициент Пуассона, $n = k - \frac{\gamma}{2}$ – коэффициент затухания напряжений, зависящий от формы поверхности контакта штампа с краевой частью массива почвогрунта. Для штампа сферической формы $k=3$, цилиндрической – 2, для плоского штампа – 1.

Тогда главное касательное напряжение (напряжение сдвига) равно:

$$\sigma_s = 0,5(\sigma_r - \sigma_\theta), \quad (4)$$

которое при сравнении с величиной предела прочности на сдвиг τ определяет выполнение критерия разрушения.

Сама величина τ является мерой препятствия сползанию вниз выделенного участка $ABED$ склона массива и для текущей нормальной компоненты σ_r в соответст-

вии с законом прочности с учетом соотношений (1) и (2) может быть оценена как функция влажности W :

$$\tau(W) = \sigma_r t g \{ \varphi(W) \} + C(W). \quad (5)$$

Радиус a контактной площадки и глубина зоны контактного сближения h связаны с весом трелевочной системы или лесозаготовительной машины Q , радиусом колеса R , модулем общей деформации E и коэффициентом Пуассона ν соотношениями [7]:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3Q(1-\nu^2)R}{4E}}; h = a^2/R. \quad (6)$$

При выполнении критерия разрушения сдвигом в массиве почвогрунта величина радиуса зоны разрушения r_p равна [8]:

$$r_p = a \left\{ 0,5 \frac{\sigma_o}{\tau} \cdot \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \right\}. \quad (7)$$

Максимально возможное расстояние от точки M действия начального давления σ_o в пределах выделенного участка склона равно длине отрезка ME :

$$ME = \sqrt{a^2 + (atg\beta - h)^2}. \quad (8)$$

Тогда в случае выполнения неравенства $r_p > ML$ разрушение будет иметь место во всех точках почвогрунта краевой части массива в пределах выделенного участка. Вес P (сила тяжести) этого участка массива равна [9]:

$$P = g\rho b \left(a^2 t g \beta - 2a \frac{\pi R^2}{360} + 0,5 \sin 2\alpha R^2 \right), \quad (9)$$

где g – величина ускорения свободного падения, ρ – плотность почвогрунта, b – ширина участка.

Плотность ρ насыщенного влагой почвогрунта увеличивается с ростом влажности W по сравнению с плотностью ρ_c в сухом состоянии пропорционально величине $(1+W/100)$, т.е. имеем [10, 11]:

$$\rho = \rho_c (1+W), \quad (10)$$

что необходимо учитывать при оценке величины P .

Выполнение критерия разрушения является необходимым, но недостаточным условием нарушения равновесия. Рассмотрим баланс сил.

Будем считать, что сила F_{cd} сдвига участка массива от действия исходной статической нагрузки Q трелевочной системы или лесозаготовительной машины вдоль поверхности ослабления составляет

$$F_{cd} = Q \cos \delta \cdot \sin \delta, \quad (11)$$

при этом удерживающая сила $F_{y\delta}$ составляет величину:

$$F_{y\delta} = P \cdot \cos \delta \cdot t g \varphi. \quad (12)$$

Силой сдвига вдоль плоскости ослабления, которую формирует вес P участка почвогрунта (порядка 60-140 кг), можно пренебречь по сравнению с величиной F_{cd} от действия веса трелевочной системы или лесозаготовительной машины при значениях $Q=12-19$ т.

В качестве критерия потери устойчивости выделенного участка массива при условии его предварительного разрушения механизмом сдвига принимаем величину

$$K = F_{cd} / F_{y\delta}. \quad (13)$$

На рис. 2 представлены результаты расчетов зависимости критерия устойчивости K от коэффициента углового сближения η для трех значений начального давления на почвогрунт. Расчеты соответствуют следующим исходным (определим их базовыми) данным: $R=0,63$ м, $b=0,28$ м, $W=35\%$, $E=1000$ кПа, $\rho_c=1000$ кг/м³,

$$Q=19\text{т}, \nu=0,35, \tau=9 \text{ кПа}, C_c=20 \text{ кПа}, \varphi_c=5^\circ. \quad (14)$$

Как следует из данных рисунка 2, по мере роста параметра η устойчивость участка массива на склоне возрастает во всем диапазоне изменения начального давления. Критерий $K < 1$, который свидетельствует о выполнении условия устойчивости, при высоком давлении на почвогрунт (84 кПа) наблюдается только при существенном отличии друг от друга угловых параметров, а именно: коэффициент $\eta > 2,5$ (угол δ более, чем в 2,5 раза превосходит значение угла φ). Уменьшение начального давления на грунт в 2 раза (до 42 кПа) обеспечивает устойчивость участка массива практически при любом соотношении угловых параметров.

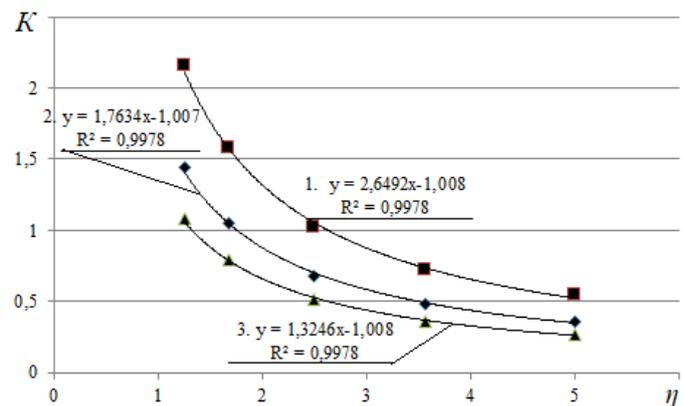


Рис. 2. Влияние коэффициента углового сближения на изменение критерия устойчивости: 1 - $\sigma_o=84$ кПа; 2 - $\sigma_o=56$ кПа; 3 - $\sigma_o=42$ кПа

Полученная аппроксимация степенными функциями с показателем степени практически равным 1 свидетельствует об обратной зависимости критерия K и коэффициента η , т.е. $K \sim \frac{1}{\eta}$, причем коэффициент пропорциональности определяется абсолютным значением начального давления на грунт σ_o .

Влияние величины σ_o на устойчивость почвогрунта отражено на рисунке 3, где представлен критерий K и σ_o , кПа. Исходные данные соответствуют базовым условиям (14) с некоторыми изменениями, а именно при $\alpha=25^\circ$, $\beta=10^\circ$, величина σ_o варьировалась от 27 до 84 кПа.

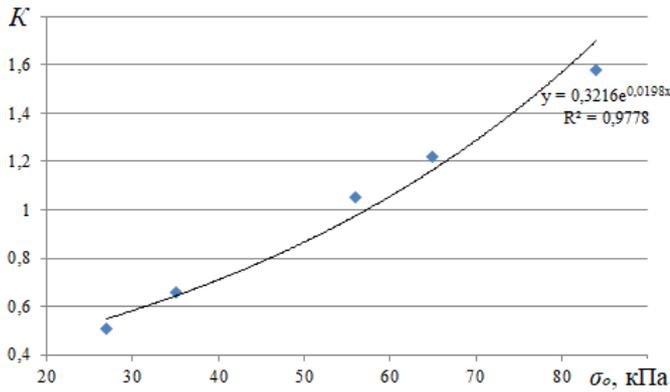


Рис. 3. Влияние величины начального давления на устойчивость участка массива на склоне

Экспоненциальный характер связи критерия устойчивости K с величиной начального давления σ_0 свидетельствует о существенном влиянии последнего на устойчивость краевой части массива. Использование трелевочных систем и лесозаготовительных машин с показателями σ_0 ниже 50 кПа является эффективным способом обеспечения устойчивой работы на склонах.

Особое влияние на достижение устойчивости поверхностного участка почвогрунта на склоне оказывает показатель его влажности W (на рис. 4 указаны значения критерия K и значения W , %). Расчеты выполнены для базовых условий (14) при $\beta=25^\circ$, $\epsilon=10^\circ$, т.е. при $n=2,5$ – угловому сближению, по достижении которого обеспечивается выполнение критерия устойчивости во всем диапазоне изменения показателей давления. Исследовались зависимости $K(W)$ при двух показателя σ_0 : $\sigma_0=56$ кПа, $\sigma_0=35$ кПа.

Экспоненциальный рост величины K с увеличением влажности W отражает крайне неустойчивое состояние краевой части оттаявшего переувлажненного участка массива вблизи с границей вечной мерзлоты, причем по мере роста W значимость фактора начального давления только увеличивается. Однако при коэффициенте углового сближения $n=2,5$ и более только для почвогрунтов с высокими показателями влажности ($W > 40\%$) при давлении на почвогрунт с $\sigma_0 \geq 56$ кПа могут быть созданы предпосылки для потери устойчивости краевой части массива.

Выполненные исследования показали, что такой параметр, как угол внутреннего трения φ почвогрунта в силу его зависимости от показателя влажности W и присутствие в соотношениях (5) и (12), для оценки прочности массива и его устойчивости является еще одним существенным фактором процесса взаимодействия трелевочной системы или лесозаготовительной машины с краевой частью массива при работе на склоне.

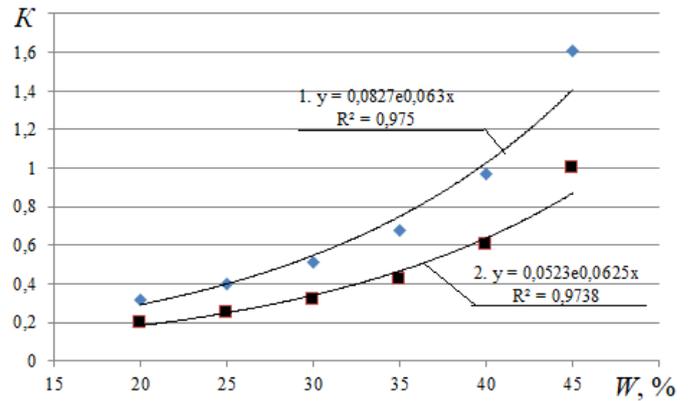


Рис. 4. Влияние показателя влажности почвогрунта на достижение его устойчивости: 1 - $\sigma_0=56$ кПа; 2 - $\sigma_0=35$ кПа

Об этом свидетельствуют данные рис. 5 (критерий K , угол φ_c , °). Расчеты соответствуют данным (14) при $W=35\%$, изменении угла φ_c от 5 до 10°, $\beta=25^\circ$, $\epsilon=10^\circ$, $\sigma_0=84$ кПа.

Анализ данных рис. 5 показывает, что с ростом угла φ устойчивость растет и показатель K снижается практически по закону обратной связи.

Поскольку в соответствии с соотношением (2) показатель влажности существенно (при больших значениях W -кратно) снижает величину угла φ , можно заключить, что вблизи с границей зоны мерзлоты участки оттаявшего массива наиболее вероятно окажутся в состоянии потери устойчивости.

Как отмечалось в работе [12], на основе изучения процессов фильтрации влаги при циклическом проходе колесной пары по одному и тому же участку волока показатель W для средних и тяжелых трелевочных систем (давление на грунт более 56 кПа) может увеличиваться на 3-5% с каждым циклом. При этом на основании теории цепей Маркова в соответствии с принципами вероятностных переходов [13, 14], использованных для количественного определения фильтрации воды из зоны разрушения в зону оттаивания, произведены оценки этого процесса для наиболее распространенных форвардеров. Показатели угла φ в этом случае не превышают 5-6° и снижаются с каждым циклом прохода форвардера. Данные рис. 4 и 5 наглядно показывают, насколько при этом в худшую сторону будут изменяться условия устойчивости участка массива.

Исследуем влияние плотности участка массива на его устойчивость, в том числе при циклическом воздействии статической нагрузки.

На рис. 6 для базовых условий (14) при $W=35\%$, $\varphi=9^\circ$, $\beta=20^\circ$, $\epsilon=15^\circ$ для двух значений начального давления σ_0 представлено влияние плотности c_c , кг/м³, на величину критерия K .

В этом случае так же, как и для данных рис. 2 уместно отметить наличие обратной связи между критерием K и плотностью c_c , причем отношение множителей перед степенными функциями, равное $1013,4/623,21=1,626$, достаточно близко к отношению показателей давлений, равному $84/56=1,5$ (отличие менее 8%).

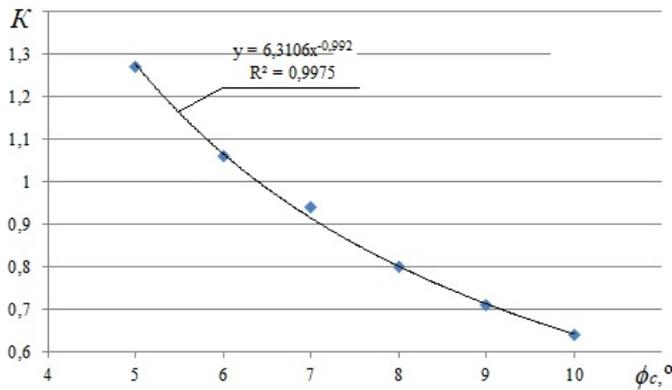


Рис. 5. Влияние угла внутреннего трения на устойчивость массива почвогрунта

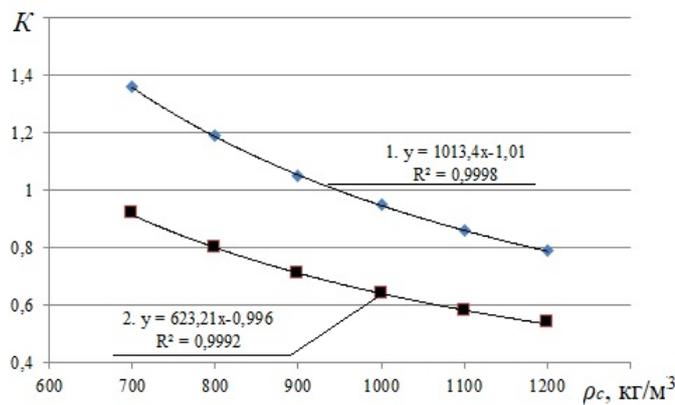


Рис. 6. Влияние плотности грунта на его устойчивость: 1 - $\sigma_\sigma=84$ кПа; 2 - $\sigma_\sigma=56$ кПа

Можно заключить, что более плотные участки массива являются и более устойчивыми, однако если при этом наблюдается чрезмерное переувлажнение уплотненных участков, то фактор влажности нивелирует положительный эффект уплотнения.

Циклический характер взаимодействия трелевочной системы с массивом почвогрунта также сказывается на его уплотнении.

В работе [15] этот процесс изучен детально и показано, что относительное уплотнение почвы растет пропорционально величине $u=1+\lg N$, где N – номер цикла прохода системы, и это необходимо учитывать при

оценке плотности конкретного участка волока. Современные лесные машины имеют колесный движитель, и давление в шинах оказывает существенное влияние на состояние краевой части массива почвогрунта. Если давление в шинах высокое, то начинается процесс разрушения и переуплотнения почвогрунта.

Известно, что после воздействия трелевочной системы лесные почвогрунты подразделяются на улучшенные, ухудшенные и малоизмененные [16-19].

К улучшенным относят почвогрунты с плотностью $\rho=1000-1400$ кг/м³, и такой почвогрунт считается оптимальным, малоизмененная почва имеет плотность 800-1000 кг/м³ и считается рыхлой, ухудшенная почва характеризуется высоким переуплотнением - $\rho=1500-1700$ кг/м³ и более [20].

Данные рис. 6 показывают, что для конкретного примера расчет участка массива с улучшенным состоянием почвогрунта обладает признаком устойчивости. Однако при циклическом воздействии и значениях $N > 5$ относительное уплотнение достигает значений 1,6 и более, т.е. состояние почвогрунта в этом случае переходит в категорию ухудшенной. Это означает, что менее плотные и более оптимальные категории почвогрунтов в большей степени подвержены разрушению и потере устойчивости при работах на склонах, тогда как участки волока с ухудшенной почвой более устойчивы к статической нагрузке.

Таким образом, результаты выполненных исследований позволяют произвести оценку устойчивости краевой части массива оттаявшего почвогрунта при взаимодействии с ним трелевочной системы на склонах.

Установлено влияние основных факторов – физико-механических, природных и технических – на состояние устойчивости локальных участков волока.

Полученные результаты обеспечивают более надежный прогноз показателей процесса образования колеи и сохранения плодородных участков почвогрунта при циклическом характере производства лесосечных работ в сложных сезонно-климатических условиях Крайнего Севера.

Литература

1. Рудов С.Е. Способы повышения работоспособности трелевочных волоков на слабонесущих почвогрунтах // Инновационные процессы в науке и технике XXI в.: материалы XVIII Междунар. науч.-практической конф. студентов, аспирантов, ученых, пед. работников и специалистов-практиков (Нижевартовск, 2020 г.). Тюмень, 2021. С. 292-295.
2. Абузов А.В., Казаков Н.В. Экологические последствия в лесных насаждениях, подверженных техногенному воздействию при лесозаготовительных и транспортных операциях // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28. № 1. С. 7-18.
3. Абузов А.В. Технологические и экологические аспекты лесозаготовок // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: материалы IX Междунар. науч.-практической конф. (29 апр. 2020 г.) / отв. ред. П.Б. Рябухин. Хабаровск, 2020. С. 9-12.
4. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем // Системы Методы Технологии. 2018. № 3 (39). С. 73-78.
5. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Вариационный метод расчета параметров взаимодействия трелевочной системы с массивом мерзлых и оттаивающих почвогрунтов // Системы Методы Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68-77.
6. Шапиро В.Я., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Григорьев М.Ф. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2018. № 1(361). С. 61-69.

7. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 с.
8. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на крайнем Севере. Л.: Госстройиздат, 1963. 492 с.
9. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. школа, 1983. 288 с.
10. Долматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. СПб.: Стройиздат, 1988. 416 с.
11. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
12. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2020. № 2 (374). С. 101-117.
13. Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности пифов // Экономическое развитие и практика: материалы Междунар. науч. конф. (5-7 апр. 2007 г.) / пред. ред. совета И.П. Бойко. СПб., 2007. С. 79-81.
14. Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Моделирование портфельных инвестиций в условиях негативных сценариев развития фондового рынка // Финансы и кредит. 2008. № 15 (303). С. 39-51.
15. Анисимов Г.М., Большаков Б.М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: ЛТА, 1998. 106 с.
16. Хитров Е.Г., Бартенев И.М. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 233-239.
17. Прядкин В.И. Воздействие экологичной шины на почву // Вестн. Воронежского гос. лесотехнического ун-та. 2011. Т. 7. № 3. С. 198-200.
18. Сюнев В.С., Давыдов Г.А. Воздействие машин на лесные почвы // Тр. лесоинженерного фак. Петрозаводского гос. ун-та. 2001. С. 88-91.
19. Сюнев В.С., Ратькова Е.И. Методика прогнозирования воздействия лесозаготовительных машин на почвогрунты в межсезонные периоды // Учен. записки Петрозаводского гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2012. № 6. С. 70-74.
20. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Оценка эффективности эксплуатации лесотранспортных систем на базе аэростатно-канатных установок // Системы Методы Технологии 2019. № 4 (44). С. 107-111.
- konf. (29 apr. 2020 g.) / otv. red. P.B. Ryabuhin. Habarovsk, 2020. P. 9-12.
4. Rudov S.E., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of forest machines and skidding // Systems. Methods. Technologies. 2018. № 3 (39). P. 73-78.
5. Rudov S.E., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Variational method for calculating the parameters of the interaction of a treble system with an array of frozen and thawing soils // Systems. Methods. Technologies. 2019. № 1 (41). P. 68-77.
6. SHapiro V.YA., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V., Grigor'ev M.F. Theoretical study of the process of destruction of the soil mass by spherical knives when using combined structures of grunometers for extinguishing forest fires // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2018. № 1 (361). P. 61-69.
7. Morozov E.M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. Izd. 2-e. M.: «LIBROKOM», 2010. 544 p.
8. Velli YU.YA., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F. Buildings and structures in the Far North. L.: Gosstrojizdat, 1963. 492 p.
9. Cytovich N.A. Mechanics of frozen soils. M.: Vyssh. shkola, 1983. 288 p.
10. Dolmatov B.I. Mechanics of soils, foundations and foundations. SPb.: Strojizdat, 1988. 416 p.
11. Vyalov S.S. Rheology of frozen soils. M.: Strojizdat, 2000. 464 p.
12. Rudov S.E., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Investigation of the process of destruction of frozen and thawing soils under the influence of the skidding system // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2020. № 2 (374). P. 101-117.
13. SHapiro V.YA., SHapiro N.A. Using Markov criteria for predicting the effectiveness of mutual funds // Ekonomicheskoe razvitie i praktika: materialy Mezhdunar. nauch. konf. (5-7 apr. 2007 g.) / pred. red. soveta I.P. Bojko. SPb., 2007. P. 79-81.
14. SHapiro V.YA., SHapiro N.A. Modeling of portfolio investments in the conditions of negative scenarios of the stock market development // Finance and Credit. 2008. № 15 (303). P. 39-51.
15. Anisimov G.M., Bol'shakov B.M. Fundamentals of minimization of soil compaction by skidding systems. SPb.: LTA, 1998. 106 p.
16. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Calculation of the depth of the wheel drive of forest tractors on the slopes // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 233-239.
17. Pryadkin V.I. The impact of eco-friendly tires on the soil // Vestn. Voronezhskogo gos. lesotekhnicheskogo un-ta. 2011. V. 7. № 3. P. 198-200.
18. Syunev V.S., Davydkov G.A. The impact of machines on forest soils // Tr. lesoinzhenernogo fak. Petrozavodskogo gos. un-ta. 2001. P. 88-91.
19. Syunev V.S., Rat'kova E.I. Methodology for forecasting the impact of logging machines on soils in the inter-seasonal periods // Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences. 2012. № 6. P. 70-74.
20. Abuzov A.V., Ryabuhin P.B. Evaluation of the efficiency of operation of forest transport systems based on balloon-rope installations // Systems. Methods. Technologies. 2019. № 4 (44). P. 107-111.

References

1. Rudov S.E. Ways to increase the efficiency of skidding drags on low-bearing soils // Innovacionnye processy v nauke i tekhnike XXI v.: materialy XVIII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov, uchenyh, ped. rabotnikov i specialistov-praktikov (Nizhnevartovsk, 2020 g.). Tyumen', 2021. P. 292-295.
2. Abuzov A.V., Kazakov N.V. Ecological consequences in forest stands exposed to technogenic impact during logging and transport operations // Vestn. Ros. un-ta druzhby narodov. Ser. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2020. V. 28. № 1. P. 7-18.
3. Abuzov A.V. Technological and ecological aspects of logging // Filosofiya sovremennogo prirodopol'zovaniya v bassejne reki Amur: materialy IH Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy