

УДК 630.3

Статья

Воздействие циклов «замораживание – оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии

Елена И. Ратькова *, Владимир С. Сюнёв и Василий К. Катаров

Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина 33, 185910 Петрозаводск, Россия; Email: siounev@psu.karelia.ru (В.С.С.); vkatarov@psu.karelia.ru (В.К.К.)

* Автор, с которым следует вести переписку; Email: ratjkova@mail.ru; Tel.: +7(906)2075326; Fax: +7(8142)711000.

Получена: 19 июня 2013 / Принята: 23 июля 2013/ Опубликована: 25 июля 2013

Аннотация: Влияние циклов «замораживание – оттаивание» на деформативные свойства лесных почво-грунтов изучено мало. Разработка технологических схем освоения лесных участков в межсезонные периоды во многом обусловлена процессами образования колеи при проходе лесозаготовительной техники. Исследование процессов, происходящих в почво-грунтах, подвергавшихся воздействию циклов «замораживание – оттаивание», позволяет обосновать методику расчета глубины колеи в зависимости от количества проходов машин. В лабораторных условиях определялись модуль деформации при сжатии, коэффициент сжимаемости и коэффициент относительной сжимаемости суглинка, взятого на территории Прионежского района Республики Карелия. Лесной почво-грунт подвергался трём циклам «замораживания – оттаивание». Установлено, что модуль деформации суглинка после первого цикла уменьшается на 16%, после второго и третьего – на 18% и 25% соответственно по отношению к значению модуля деформации до замораживания. Коэффициент сжимаемости увеличивается на 18% после первого цикла, на 22% после второго цикла и на 33% после третьего. Уменьшение модуля деформации, увеличение коэффициента сжимаемости суглинка объясняется изменением структуры почво-грунта под влиянием циклов «замораживание – оттаивание».

Ключевые слова: почво-грунт; суглинок; модуль деформации; коэффициент сжимаемости; межсезонные периоды; глубина колеи

Article

Deformation Properties of Forest Soils in Karelia Affected by "Freeze-Defrost" Cycles

Elena I. Ratjkova^{*}, Vladimir S. Syunev and Vasiliy K. Katarov

Petrozavodsk State University, Lenin av. 33, 185910 Petrozavodsk, Russia; Email: siounev@psu.karelia.ru (V.S.S.); vkatarov@psu.karelia.ru (V.K.K.)

^{*} Author to whom correspondence should be addressed; Email: ratjkova@mail.ru; Tel.: +7(906)2075326; Fax: +7(8142)711000.

Received: 19 June 2013 / Accepted: 23 July 2013 / Published: 25 July 2013

Abstract: The impact of “freeze-defrost” cycles on the deformation properties of forest soils has been little studied. The layout of technological schemes of harvesting sites development in off-season periods (spring, fall) depends a lot on the formation of ruts when wood harvesting machinery passes. The study of processes occurring in forest soils affected by “freeze-defrost” cycles enables to justify the method of calculating rut depth depending on the number of machinery passes. The compression modulus of deformation, compressibility coefficient and relative compressibility coefficient of clay loam which was collected in the forest of the Republic of Karelia were determined in laboratory conditions. Forest soil samples underwent three “freeze-defrost” cycles. It has been determined clay loam deformation modulus after the first cycle reduces by 16% and after the second and third cycles it reduces by 18% and 25% respectively in relation to the value of deformation modulus before freezing. Compressibility coefficient increases by 18% after the first cycle, it increases by 22% after the second cycle and by 33% after the third one. The decrease of deformation modulus and the increase of clay loam compressibility coefficient are due to changes in the structure of forest soils under the influence of “freeze-defrost” cycles.

Keywords: forest soils; clay loam; deformation modulus; compressibility coefficient; off-season periods; rut depth

1. Введение

На территории Северо-Западного федерального округа преобладают почво-грунты III и IV категорий [1], слабая несущая способность и деформационные свойства которых снижают возможность использования современной лесозаготовительной техники. По этой причине затруднена заготовка древесины в безморозный период года, особенно в период дождей, и межсезонные периоды (весна, осень). Ограничения на применение лесозаготовительных машин определяются условиями колееобразования, величиной давления движителя на поверхность движения, деформационными и прочностными свойствами почво-грунтов.

Промерзание лесных почво-грунтов на достаточную глубину снимает ограничения на применение лесозаготовительных машин. Однако и в зимний период оттепели часто вносят неопределенность в оперативное планирование лесозаготовок. В межсезонные периоды по причине более интенсивного колееобразования объективно формируются ограничения на количество проходов лесозаготовительных машин, что усложняет разработку лесосеки. В это время работы по заготовке древесины с использованием лесозаготовительных машин часто прекращаются.

В определенной мере изучение дополнительных возможностей эксплуатации волоков в межсезонные периоды позволило бы уменьшить продолжительность технологических перерывов лесозаготовительных работ с использованием техники.

Появляющаяся в этой связи многоплановая проблема технологически возможной и экономически целесообразной интенсификации использования дорожно-транспортной инфраструктуры и дорогостоящей лесозаготовительной техники в межсезонные периоды с учетом требований рационального природопользования приобретает особую актуальность в современных условиях. Соответственно, для решения научно-практических задач, связанных с данной проблемой, требуется разработка как экспериментальных методов, так и методов математического моделирования. При разработке методик решения данных задач необходимо учитывать российский и зарубежный опыт. Данная работа выполнена с учетом условий функционирования лесопромышленного комплекса в северо-западных регионах Российской Федерации.

Опыт решения ряда задач по развитию транспортной инфраструктуры лесной отрасли Финляндии отражен в работе [2]. Использование этого опыта возможно после его адаптации к условиям российских регионов. Как в финских, так и в российских методиках проектирования лесных дорог учитываются усреднённые зависимости несущей способности грунта от его гранулометрического состава и накопления в нём влаги [3].

Воздействие колесных движителей на лесные почво-грунты рассмотрено в статье [4], в которой предложены математические модели послойного уплотнения почво-грунта крупногабаритными шинами с развитыми грунтозацепами.

Задача распределения проходов трелевочного трактора по длине волока с учетом колееобразования рассмотрена в статье [5]. Предложено уменьшать в процессе трелевки

расчетную рейсовую нагрузку на трактор в зависимости от прогнозируемого увеличения глубины колеи на участках волока со слабой несущей способностью грунта.

В статье [6] сжимаемость почво-грунтов изучена как процесс разрушения их микроструктуры, элементы которой проявляют свойства упругости и вязкопластичности. Предложена модель сжимаемости, основанная на известных представлениях о микроструктуре и выявленном автором эффекте цикличности скорости деформирования почво-грунтов.

Методика определения глубины колеи с учетом прочности грунта смятию предложена в статье [7]. В статье [8] предложена многокомпонентная модель лесной почвы как опорной поверхности движения лесохозяйственных машин. Краткий обзор других публикаций по затронутой теме приведен в материалах [9]. Не останавливаясь на детальном анализе публикаций, отметим, что авторы многих работ по теме данной статьи отмечают сложность и недостаточную изученность системы «лесозаготовительная машина – почво-грунт». При этом к числу наиболее сложных и актуальных относится названная выше задача моделирования техногенного воздействия на лесные почво-грунты с учетом особенностей межсезонных периодов.

Для прогнозирования техногенного воздействия в работе [9] предложена двухпараметрическая модель для определения глубины колеи в зависимости от числа проходов лесозаготовительной машины. В модели используется логистическое уравнение. Заметим, что это уравнение использовано в качестве корреляционной зависимости с четырьмя параметрами в методике расчета осадки насыпи на слабых грунтах [10]. В качестве исходных данных для вычислений по предложенной в этой работе модели требуется знание глубины колеи после первого прохода лесозаготовительной машины.

Анализ представленных выше работ показал, что теоретическое определение глубины колеи после первого прохода колесной или гусеничной машины возможно, если известны модуль деформации, пористость и другие характеристики почво-грунта. Эти характеристики для усредненных почвенно-климатических условий можно найти в справочной литературе [11]. Однако оценка зависимости этих характеристик от почвенно-климатических условий региона в межсезонные периоды требует продолжения исследований для уточнения представлений о процессах колееобразования на почво-грунтах при воздействии лесозаготовительных машин.

В качестве предмета исследования в данной статье рассматривается влияние циклов «замораживание – оттаивание» на физико-механические характеристики почво-грунтов. Такие циклы неоднократно повторяются в межсезонные периоды (весна, осень). Известно, что вода, превращаясь в лёд, увеличивает свой объём примерно на 9% [12]. Почво-грунт естественной влажности не способен противодействовать такому увеличению объема содержащейся в нем воды (в форме льда). С изменением объема появляются внутренние силы, разрушающие связи между частицами почво-грунта. Как следствие, могут различаться его физико-механические свойства до замораживания и после оттаивания. Очевидно,

особенно заметными эти различия будут в межсезонные периоды, для которых характерна высокая естественная влажность почво-грунтов и повторение циклов «замораживание – оттаивание».

Внешнее проявление увеличения объема влажного грунта при отрицательных температурах хорошо известно и обозначается термином «морозное пучение». Морозное пучение является проявлением сложных процессов изменений состояния и структуры грунта. Детальный анализ этих изменений выходит за рамки данной работы. Рассмотрим только недостаточно изученный, что показал анализ литературы [1–27], вопрос о влиянии циклов «замораживание – оттаивание» на изменения коэффициента сжимаемости и модуля деформации почво-грунта. Рассмотрение этого вопроса необходимо для уточнения представлений о процессах колееобразования в межсезонные периоды. По причине недостаточной изученности вопроса и для методологической полноты исследования сформулируем гипотезу, правомерность существования которой проверим экспериментально.

С учетом изложенного выше гипотеза исследования формулируется в следующем виде: замораживание почво-грунта естественной влажности и фазовые превращения воды служат причинами, по которым структура и, как следствие, физико-механические свойства почво-грунта после цикла «замораживание – оттаивание» могут отличаться от свойств того же почво-грунта до его замораживания. Повторные циклы «замораживание – оттаивание» также могут приводить к снижению деформируемости и изменению физических показателей почво-грунта. На правомерность такой гипотезы и на необходимость её экспериментальной проверки указали, наряду с анализом указанных выше публикаций, предварительные наблюдения за процессом колееобразования в сезонные и межсезонные периоды лесозаготовок.

Заметим, что в теоретических построениях механики лесной почвы [8], по причине её сложности как объекта исследования, часто используются упрощающие предположения, правомерность которых проверяется экспериментально. В нашем случае экспериментальная проверка гипотезы позволит количественно оценить указанное выше влияние циклов «замораживание – оттаивание».

2. Материалы и методы

В качестве почво-грунта для исследования был взят суглинок в текучепластичном состоянии, залегающий на лесной территории Прионежского района Республики Карелия. Влажность суглинка составляла 32% (0,32 д.е.), коэффициент пористости – 91% (0,91 д.е.). Для испытаний были подготовлены 12 образцов почво-грунта. Все эксперименты выполнялись на стандартном лабораторном оборудовании по методике, стандартной для механики грунтов (Рис. 1 и 2).



Рисунок 1. Подготовленные к лабораторным испытаниям образцы суглинка в режущих кольцах.



Рисунок 2. Лабораторные испытания образцов.

Особенность использованной методики заключается в следующем:

- одна часть образцов испытывалась до замораживания, а другая часть таких же образцов того же грунта испытывалась после одного, двух и трех циклов «замораживание – оттаивание»;

- нагружение проводилось ступенями по 0,05 МПа на первых двух ступенях и 0,1 МПа на третьей ступени с выдержкой по 5 минут.

Замораживание образцов осуществлялось в морозильной камере при температуре $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 12 часов, оттаивание – при температуре $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 9 часов.

За результат испытаний принималось среднее арифметическое значение параллельных определений соответствующего метода.

Физические показатели почво-грунта определялись по методике, приведенной в ГОСТ 5180-84 [28].

Плотность грунта ρ определялась методом режущего кольца:

1. Режущее кольцо взвешивалось с погрешностью не более 0,02 г.
2. С помощью штангенциркуля измерялся внутренний диаметр и высота кольца с погрешностью не более 0,1 мм. По результатам измерений вычислялся объем кольца с точностью до $0,1\text{ см}^3$.

3. На внутреннюю часть кольца наносился тонкий слой вазелина. Поверхность монолита грунта зачищалось ножом, и кольцо устанавливалось в его средней части острым краем вниз.

4. С помощью переталкивателя кольцо погружалось в монолит грунта на 2–3 мм. Для уменьшения силы трения грунт с внешней стороны кольца удалялся с помощью ножа. Погружение кольца в монолит грунта производилось описанным выше способом до тех пор, пока грунт не заполнил кольцо и не оказался выше края кольца на 1–2 мм.

5. Излишки грунта на торцах образца срезались ножом, поверхность грунта зачищалась правилом вровень с краями кольца.

6. Грунт ниже кольца подрезался “на конус”. Кольцо с грунтом переворачивалось конусом вверх.

7. Конус мелкими дольками осторожно срезался, и поверхность грунта зачищалась правилом вровень с краями кольца.

8. Кольцо тщательно протиралось с внешней стороны и взвешивалось вместе с грунтом с точностью до 0,02 г.

9. По результатам взвешивания производилось вычисление плотности грунта как отношение массы образца грунта к его объему.

Влажность грунта W определялась в следующей последовательности:

1. Взвешивался бюкс с точностью до 0,02 г.

2. Грунт выталкивался из кольца, делился на четыре равные части. Из каждой части с разных мест брались пробы. Отобранные пробы помещались в бюкс.

3. Бюкс с влажным грунтом взвешивался с точностью до 0,02 г.

4. Бюкс в открытом виде помещался в сушильный шкаф, где грунт высушивался до постоянной массы при температуре 105 °С.

5. Бюкс с сухим грунтом взвешивался.

6. По результатам взвешивания вычислялась влажность грунта как отношение массы воды, содержащейся в грунте, к массе грунта, высушенного при температуре 105 °С до постоянной массы.

Порядок испытания грунта для определения влажности грунта на границе текучести W_L :

1. Грунтовое тесто, полученное из грунта путем разведения водой, тщательно перемешивалось и укладывалось с равномерной плотностью в металлический стаканчик.

2. Конус Васильева смазывался вазелином и отпускался в грунт.

3. Если конус за 5 секунд погружался в грунт на глубину менее 10 мм, то грунтовое тесто перекладывалось из стаканчика в чашку, к нему добавлялась вода, грунт тщательно перемешивался и снова испытывался.

4. Если конус за 5 секунд погружался в грунт на глубину более 10 мм, то в грунтовое тесто добавлялся сухой грунт, и после перемешивания опыт повторялся.

5. Если конус за 5 секунд погружался в грунт на глубину 10 мм, то из стаканчика отбиралась проба грунта (не менее 10 граммов) и помещалась в бюкс.

6. Влажность грунта на границе текучести W_L определялась по методике определения естественной влажности грунта.

Порядок испытания грунта для определения влажности грунта на границе раскатывания W_P :

1. Из грунтовой массы раскатывался жгут диаметром 3 мм.
2. Если при раскатывании жгут не крошился, то он переминался, скатывался в шарик и снова раскатывался до указанного диаметра.
3. Если жгут диаметром 3 мм покрывался сетью трещин и начинал крошиться на отдельные кусочки длиной 3–8 мм, то эти кусочки собирались в бюкс.
4. Влажность грунта на границе раскатывания W_P определялась по методике определения естественной влажности грунта.

По найденным значениям W , W_L и W_P , вычислялись число пластичности I_P и показатель текучести I_L по формулам:

$$I_L = w_L - w_P, \quad (1)$$

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P}, \quad (2)$$

где

w – влажность грунта в естественном состоянии;

w_P – влажность на границе раскатывания;

w_L – влажность на границе текучести.

По числу пластичности I_P и показателю текучести I_L устанавливалось наименование грунта и его состояние.

Остальные физические показатели определялись по формулам.

Испытание почво-грунта для определения характеристик деформируемости (коэффициента сжимаемости m_0 и модуля деформации E_0) проводилось методом компрессионного сжатия по ГОСТ 12248-2010 [29]. Эти характеристики определялись по результатам испытаний образцов грунта в компрессионных приборах (одеметрах), исключающих возможность бокового расширения образца при его нагружении вертикальной нагрузкой. Испытания проводились в следующем порядке:

1. Образец грунта в рабочем кольце взвешивался, покрывался с торцов влажными кружками фильтровальной бумаги и устанавливался в компрессионный прибор.
2. К образцу грунта прикладывалась нагрузка ступенями по 0,05 МПа, 0,1 МПа и 0,2 МПа. На каждой ступени давления снимались показания по индикатору через 15, 30 секунд, 1, 2, 5 минут от начала приложения нагрузки с погрешностью измерений не более 0,01 мм. Образец грунта выдерживался на каждой ступени загрузки до условной стабилизации деформации. Принималось, что деформация грунта достигает условной стабилизации через 5 минут после приложения очередной ступени нагрузки.

3. После условной стабилизации деформации грунта при давлении 0,2 МПа образец грунта разгружался до давления 0,1 МПа, 0,05 МПа и 0 МПа. Отсчеты по индикатору брались на каждой ступени разгрузки через 1, 2, 3, 5 минут.

4. По величинам условно стабилизированных осадок вычислялись изменения коэффициента пористости на каждой ступени загрузки и разгрузки и соответствующие значения коэффициента пористости. Все вычисления производились с точностью до 0,001.

5. По результатам испытаний строились компрессионная и декомпрессионная кривые.

6. Для испытанного грунта по компрессионной кривой определялся коэффициент сжимаемости m_0 .

7. По найденному значению коэффициента сжимаемости вычислялись коэффициент относительной сжимаемости m_v и модуль общей деформации E :

$$m_v = \frac{m_0}{1 + e_0}, \quad (3)$$

где e_0 - начальный коэффициент пористости грунта,

$$E = \frac{\beta}{m_v}, \quad (4)$$

где β - безразмерный коэффициент, зависящий от коэффициента бокового расширения грунта ν .

3. Результаты

По результатам испытаний для почво-грунта каждого образца строилась компрессионная кривая, определялись влажность, коэффициент пористости, коэффициент сжимаемости и модуль деформации. Компрессионные кривые представлены на Рис. 3–6.

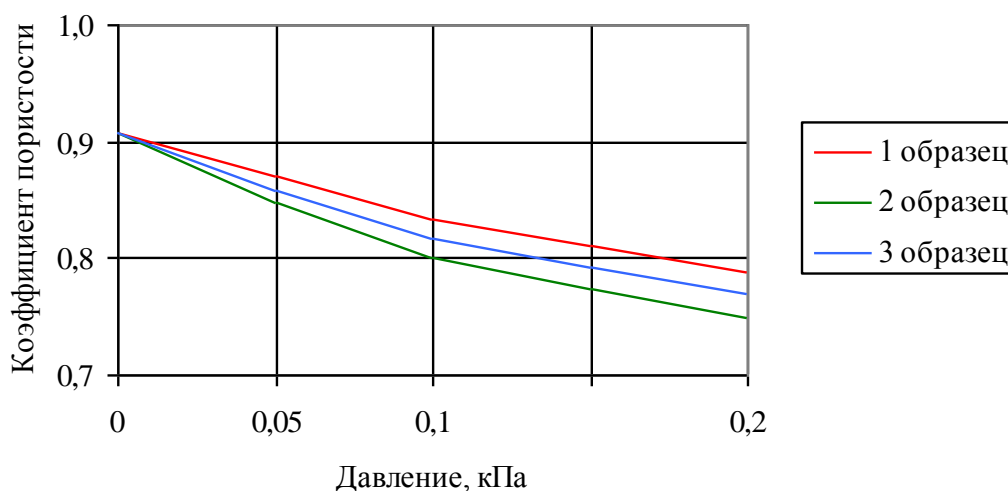


Рисунок 3. Компрессионная кривая почво-грунта, испытанного без замораживания.

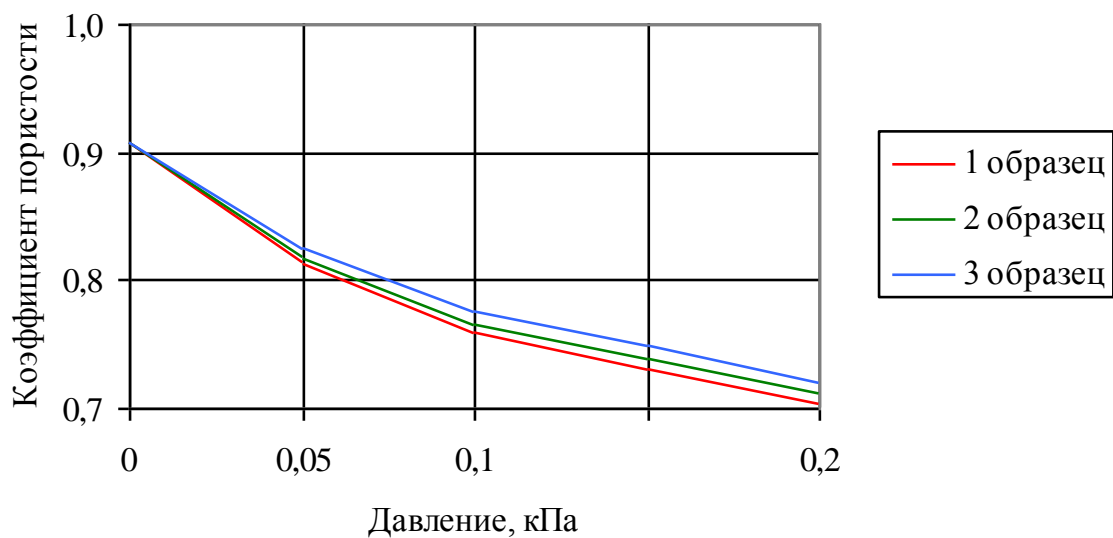


Рисунок 4. Компрессионная кривая почво-грунта после 1 цикла замораживания.

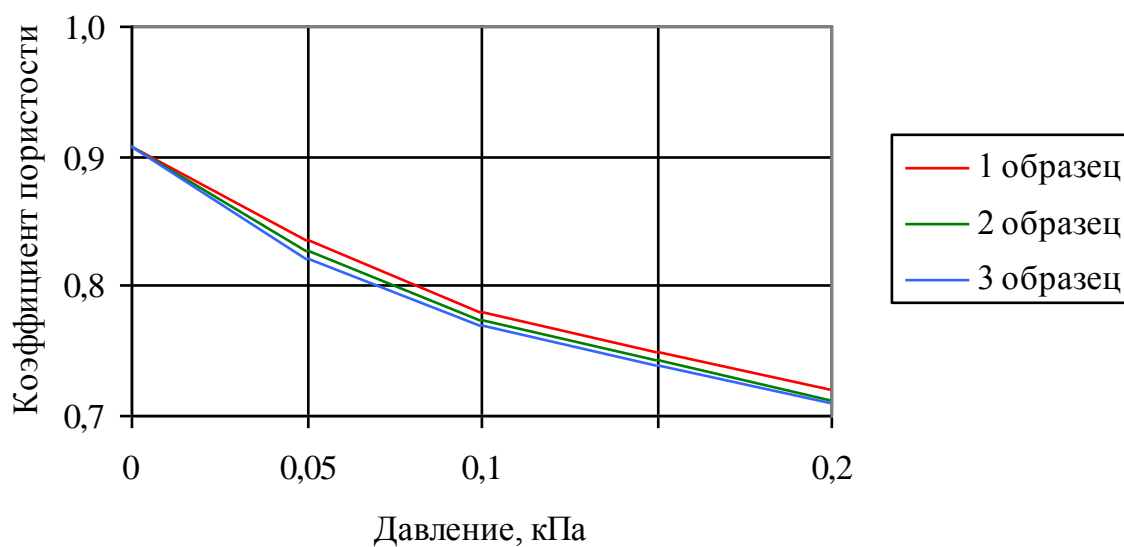


Рисунок 5. Компрессионная кривая почво-грунта после 2 циклов замораживания.

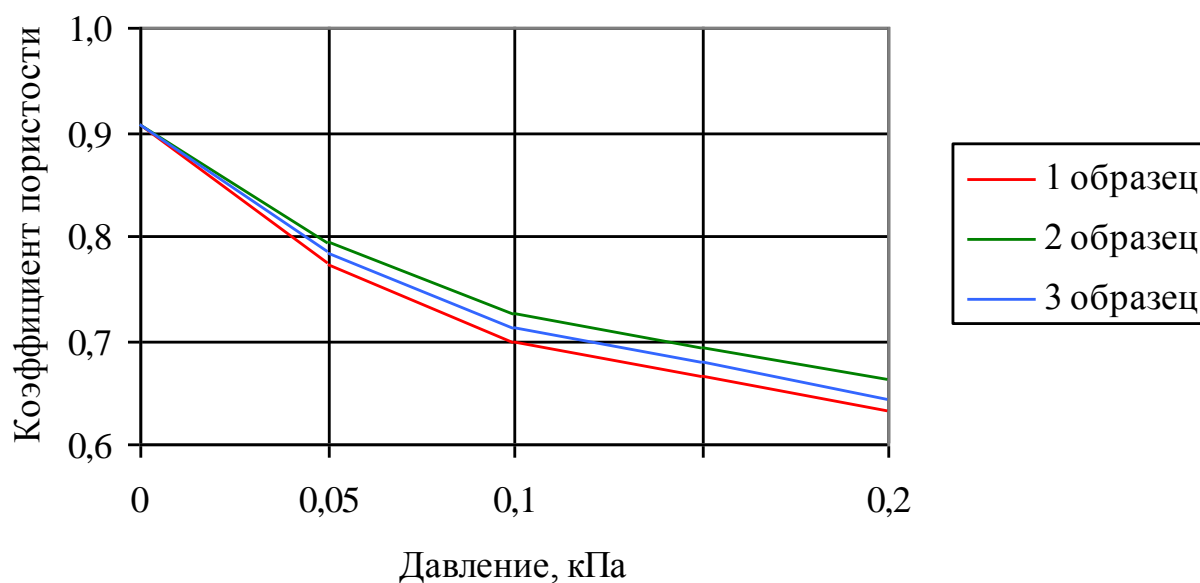


Рисунок 6. Компрессионная кривая почво-грунта после 3 циклов замораживания.

Результаты испытаний приведены в Табл. 1. Средние значения характеристик почво-грунта определялись как средние арифметические значения параллельных определений.

Таблица 1. Средние значения характеристик почво-грунта до замораживания и после оттаивания.

Состояние	Влажность w , д.е.	Коэффициент пористости e , д.е.	Модуль деформации E , МПа	Коэффициент сжимаемости m_0 , МПа ⁻¹	Коэффициент относительной сжимаемости m_v , МПа ⁻¹
Без замораживания	0,283	0,769	3,755	0,591	0,310
1 цикл замораживания	0,258	0,711	3,156	0,700	0,367
2 цикла замораживания	0,254	0,724	3,095	0,718	0,377
3 цикла замораживания	0,247	0,653	2,822	0,784	0,411

Результаты испытаний (см. Табл. 1) показали, что при многократных процессах замораживания и оттаивания после каждого цикла «замораживание – оттаивание» модуль деформации суглинка уменьшается, а коэффициент сжимаемости и коэффициент

относительной сжимаемости увеличиваются. Наиболее интенсивные изменения происходят в первом цикле. В следующих циклах увеличение коэффициента сжимаемости и коэффициента относительной сжимаемости, а также уменьшение модуля деформации суглинка замедляются (Рис. 7).

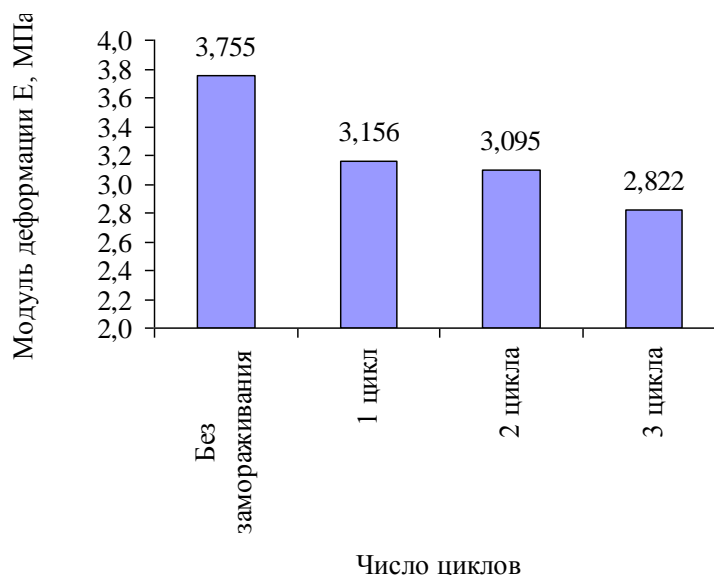


Рисунок 7. График зависимости модуля деформации от числа циклов.

Изменение физико-механических характеристик почво-грунта при многократных циклах «замораживание – оттаивание» представлено в Табл. 2.

Таблица 2. Изменение физико-механических характеристик почво-грунта при многократных циклах «замораживание – оттаивание».

Состояние	Влажность w , д.е.	Модуль деформации E , МПа	Коэффициент сжимаемости m_0 , МПа ⁻¹	Коэффициент относительной сжимаемости m_v , МПа ⁻¹
Без замораживания	0,283 (100%)	3,755 (100%)	0,591 (100%)	0,310 (100%)
1 цикл	-9%	-16%	18%	18%
2 цикла	-10%	-18%	22%	22 %
3 цикла	-13%	-25%	33%	33%

4. Обсуждение и заключение

Полученные данные, подтверждая сформулированную выше гипотезу, могут быть использованы на практике для прогнозирования глубины колеи. Например, по причине оттаивания почво-грунтов в дневное время и промерзания в ночное в межсезонные периоды возможно локальное увеличение глубины колеи на некоторых избыточно увлажнённых участках волока (Рис. 8).



Рисунок 8. Локальное увеличение глубины колеи при оттепели на избыточно увлажнённом участке волока.

Принимая во внимание метеорологические данные о температуре и учитывая характеристики почво-грунтов, можно по известной методике [9,30] с использованием представленных выше результатов определить прогнозируемую величину колеи для конкретного вида лесозаготовительной машины. Если прогнозируемая глубина колеи окажется недопустимо большой, то на данном участке рекомендуется локальное укрепление волока порубочными остатками (Рис. 9).

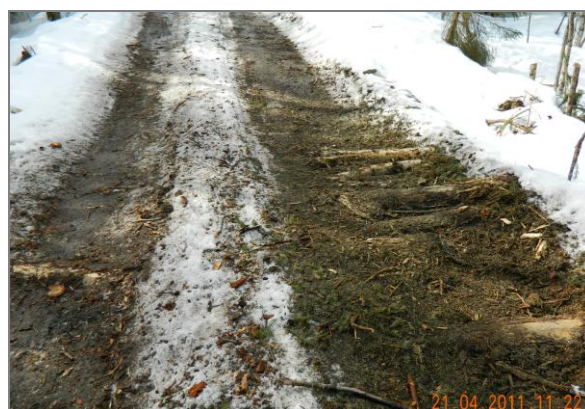


Рисунок 9. Локальное укрепление волока порубочными остатками.

Целесообразно формирование региональной базы данных о рассмотренных свойствах лесных почво-грунтов с учетом их сезонных и межсезонных изменений.

Подтверждено, что повторение циклов «замораживание – оттаивание» влияет на физические и деформационные свойства грунтов. При многократных процессах замораживания и оттаивания после каждого цикла коэффициент сжимаемости и коэффициент относительной сжимаемости увеличиваются, а модуль деформации уменьшается. Полученные результаты могут быть использованы в целях уточнения теоретических представлений о процессах колеобразования на почво-грунтах при воздействии лесозаготовительных машин в межсезонные периоды. Практическое значение полученных результатов определяется возможностью их использования для определения прогнозируемой глубины колеи в межсезонные периоды в целях обоснования локального укрепления волоков лесосечными отходами.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012 – 2016 гг.

Литература

1. Виногоров Г. К. Лесосечные работы. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 272 с.
2. Герасимов Ю.Ю., Карвинен С., Сюнёв В.С., Соколов А.П., Катаров В.К. Развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли – опыт Финляндии // Транспортное дело России. – 2009. – № 77. – С. 99–102.
3. Герасимов Ю.Ю., Катаров В.К. Лесные дороги. Йёнсуу: Научно-исследовательский институт леса Финляндии, 2009. – 70 с.
4. Григорьев И.В., Шкрум В.Д. Теория послойного уплотнения почвы крупногабаритными шинами лесопромышленного трактора // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2005. – № 175. – С. 134–141.
5. Пискунов М.А., Воронов Р.В., Васильев В.Н., Воронова А.М. Распределение проходов по длине волока и расчёт рейсовых нагрузок трелёвочного трактора при движении по грунтам с низкой несущей способностью на примере хлыстовой технологии заготовки леса // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 77. – С. 281–291.
6. Ляшенко П.А. Природа сжимаемости почв и грунтов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2006. – № 19. – С. 9–28.
7. Цыпук А.М., Родионов А.В. Определение глубины колеи лесных машин // Лесная промышленность. – 2004. – № 2. – С. 21–22.
8. Коршун В.Н. Основы механики лесной почвы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2006. – № 4. – С. 47–54.
9. Ратькова Е.И. Моделирование техногенного воздействия на лесные почвогрунты с учетом особенностей межсезонных периодов // «Леса России в XXI веке». Материалы

шестой международной научно-технической Интернет-конференции. Март 2011 г. / СПб: СПбГЛТА, 2011. – С. 227–234.

10. Семендяев Л.И. Усовершенствованная методика расчета осадки насыпи на слабых грунтах на основе реализации математических моделей процессов лабораторных испытаний образцов. – М.: СоюзДорНИИ, 2002.
11. Матвеев Л.С. Автомобильные лесовозные дороги: Справочник. Второе изд., перераб. и доп. – М.: Экология, 1991. – 336 с.
12. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии). – Л.: Стройиздат, 1988. – 415 с.
13. Герасимов Ю.Ю., Сюнёв В.С. Экологическая оптимизация технологических процессов и машин для лесозаготовок. Йёнсуу: Университет Йёнсуу, Финляндия, 1998. – 178 с.
14. Сюнёв В.С., Соколов А.П., Коновалов А.П., Катаров В.К., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Карвинен С., Вяльккю Э. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йёнсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2008. – 126 с.
15. Batelaan J. Development of an all terrain vehicle suspension with an efficient, oval track // *Journal of Terramechanics*. – 1998. – № 35(4). – С. 209–223.
16. Bygdén G., Eliasson L., Wästerlund I. Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks // *Journal of Terramechanics*. – 2003. – № 40(3). – С. 179–190.
17. Eliasson L., Wästerlund I. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil // *Forest Ecology and Management*. – 2007. – № 252(1–3). – С. 118–123.
18. Gerasimov Y., Katarov V. Effect of bogie track and slash reinforcement on sinkage and soil compaction in soft terrains // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2009. – № 31. – С. 35–45.
19. Gerasimov Y., Sokolov A. Ergonomic characterization of harvesting work in Karelia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2009. – № 30(2). – С. 159–170.
20. McDonald T. P., Seixas F. Effect of slash on forwarder soil compaction // *International Journal of Forest Engineering*. – 1997. – № 8(2). – С. 15–26.
21. McMahon S., Evanson T. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage // *LIRO Report*. – 1994. – № 19(1). – С. 1–8.
22. Šušnjar M., Horvat D., Šešelj J. Soil compaction in timber skidding in winter conditions // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2006. – № 27(1). – С. 3–15.
23. Sakai H., Nordfjell T., Suadicani K., Talbot B., Bøllehuus E. Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2008. – № 29(1). – С. 15–27.
24. Jakobsen B. F., Moore G.A. Effects of two types of skidders and of a slash cover on soil compaction by logging of mountain ash // *Australian Journal of Forest Research*. – 1981. – № 11. – С. 247–255.
25. Zeleke G., Owende P. M. O., Kanali C. L., Ward, S. M. Predicting the pressure – sinkage characteristics of two forest sites in Ireland using in situ soil mechanical properties // *Biosystems Engineering*. – 2007. – № 97(2). – С. 267–281.
26. Катаров В.К., Сюнёв В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почво-грунты // *Resources and Technology*. – 2012. – № 9 (2). – С. 73–81.
27. Ратькова Е.И. Изменения состояния лесных грунтов в переходные периоды: промерзание и оттаивание // *Resources and Technology*. – 2010. – № 8. – С. 123–125.
28. ГОСТ 5180-84. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М., 1985.

29. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М., 2012.
30. Ратькова Е.И., Сюнёв В.С., Катаров В.К. Влияние цикла «замораживание – оттаивание» на модуль деформации и коэффициент сжимаемости суглинков // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – № 4(133). – С. 75–78.

References

1. Vinogorov, G.K. 1981. Logging operations (in Russian). Forest Industry, Moscow, Russia, 272 pp.
2. Gerasimov, Y., Karvinen, S., Syunev, V., Sokolov, A., Katarov, V., 2009. Development of transportation infrastructure in forest industry – Finnish experience (in Russian). *Transport Business in Russia* 77: 99–102.
3. Gerasimov, Y., Katarov, V., 2009. Forest roads. Forest Research Institute of Finland, Joensuu, Finland, 70 pp.
4. Grigorjev, I., Shkrum, V. 2005. Theory of soil consolidation by logging tractor tires of large dimension (in Russian). *Proceedings of Saint-Petersburg Forest Academy* 175: 134–141.
5. Piskunov, M., Voronov, R., Vasiljev, V., Voronova, A. 2012. Distribution of tracks along skidding roads and calculation of trailing tractor's load on forest soils on the examples of tree-length timber harvesting (in Russian). *Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University* 77: 281–291.
6. Lyashenko, P., 2006. Nature of Soils' Decrease. *Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University* 19: 9–28.
7. Tsypuk, A., Rodionov, A., 2004. Definition of the rut depth induced by the forest vehicles (in Russian). *Forest Industry* 2: 21–22.
8. Korshun, V., 2006. Foundations of forest soils mechanics (in Russian). *Forest Journal* 4: 47–54.
9. Ratjkova, E., 2011. Modeling of man-induced impact on wood soils including special features of transitional seasons (in Russian). In *Russian Forests in XXI century*, Proceedings of the IV international scientific and technical internet conference, Saint Petersburg March 2011, pp. 227–234.
10. Semendyaev, L.I. 2002. Advanced calculation methods of embankment displacement on weak soils with the use of mathematical models obtained in laboratory settings (in Russian). State Road Construction Institute, Moscow, Russia.
11. Matvieenko, L. 1991. Automobile Hauling Roads: Directory (in Russian). Ecology, Moscow, Russia, 336 pp.
12. Dalmatov, B.I. 1988. Mechanics of soil, foundation and foundations (in Russian). Stroyizdat, Saint Petersburg, Russia, 415 pp.
13. Gerasimov, Y., Syunev, V. 1998. Ecological optimization of logging technology and machinery. University of Joensuu, Joensuu, Finland, 178 pp.
14. Syunev, V., Sokolov, A., Konovalov, A., Katarov, V., Selivestrov, A., Gerasimov, Y., Karvinen, S., Valkky, E. 2008. Comparison of logging operation technologies in forest harvesting companies of Karelia. Finnish Forest Research Institute, Joensuu, Finland, 126 pp.
15. Batelaan, J. 1998. Development of an all terrain vehicle suspension with an efficient, oval track. *Journal of Terramechanics* 35(4): 209–223.
16. Bygdén, G., Eliasson, L., Wästerlund, I. 2003. Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. *Journal of Terramechanics* 40(3): 179–190.

17. Eliasson, L., Wästerlund, I. 2007. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *Forest Ecology and Management* 252(1–3): 118–123.
18. Gerasimov, Y., Katarov, V. 2010. Effect of bogie track and slash reinforcement on sinkage and soil compaction in soft terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering* 31(1): 35–45.
19. Gerasimov, Y., Sokolov, A. 2009. Ergonomic characterization of harvesting work in Karelia. *Croatian Journal of Forest Engineering* 30(2): 159–170.
20. McDonald, T.P., Seixas, F. 1997. Effect of slash on for warder soil compaction. *International Journal of Forest Engineering* 8(2): 15–26.
21. McMahan, S., Evanson, T. 1994. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. *LIRO Report* 19(1): 1–8.
22. Šušnjar, M., Horvat, D., Šešelj, J. 2006. Soil compaction in timber skidding in winter conditions. *Croatian Journal of Forest Engineering* 27(1): 3–15.
23. Sakai, H., Nordfjell, T., Suadican, K., Talbot, B., Bøllehuus, E. 2008. Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. *Croatian Journal of Forest Engineering* 29(1): 15–27.
24. Jakobsen, B. F., Moore, G.A. 1981. Effects of two types of skidders and of a slash cover on soil compaction by logging of mountain ash. *Australian Journal of Forest Research* 11: 247–255.
25. Zeleke, G., Owende, P.M. O., Kanali, C.L., Ward, S.M. 2007. Predicting the pressure – sinkage characteristics of two forest sites in Ireland using in situ soil mechanical properties. *Biosystems Engineering* 97(2): 267–281.
26. Katarov, V., Syunev, V., Ratjkova E., Gerasimov, Y. 2012. Impact of wood forwarding on forest soils (in Russian). *Resources and Technology* 9 (2): 73–81.
27. Ratjkova, E. 2010. Changes of a condition of wood soils in interseasonal: freezing and defrosting (in Russian). *Resources and Technology* 8: 123–125.
28. GOST 5180-84. 1985. Soils: Laboratory methods for determination of physical characteristics. State Standard, Moscow, Russia.
29. GOST 12248-2010. 2012. Soils. Laboratory methods for determining the strength and strain characteristics. State Standard, Moscow, Russia.
30. Rat'kova E.I., Syunev V.S., Katarov V.K. 2013. Effect of “freezing and defrosting” on deformation module and coefficient of clay loam reduction (in Russian). *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Science* 4(133): 75–78.