

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВОГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

кандидат технических наук **С.Е. Рудов**¹

доктор технических наук, профессор **В.Я. Шапиро**²

доктор технических наук, профессор **И.В. Григорьев**³

доктор технических наук, профессор **О.А. Куницкая**³

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент **О.И. Григорьева**²

доктор технических наук, доцент **Т.Н. Стородубцева**⁴

1 – ФГКВОУ ВПО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»,

г. Якутск, Российская Федерация

4 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,

г. Воронеж, Российская Федерация

Установление закономерностей влияния температуры мерзлых почвогрунтов на их физико-механические свойства позволяет произвести более точные оценки параметров процесса взаимодействия лесных машин и трелевочных систем с массивом почвогрунта при выполнении лесосечных работ с заранее заданными статическими нагрузками. Адекватная оценка состояния краевой части мерзлого массива почвогрунта является основой для формирования начальных условий при расчетах параметров разрушения напряженно-деформированного мерзлого слоя почвогрунта, процессов его уплотнения и деформации под действием статических нагрузок, возникающих при эксплуатации различных лесных машин и трелевочных систем. В статье представлены методика, аппаратное обеспечение и результаты обработки данных, полученных при натуральных экспериментальных исследованиях по определению влияния температуры мерзлого почвогрунта на его прочностные и деформационные свойства. Для выявления закономерностей изменения температуры почвогрунта по глубине, а также с целью отбора проб почвогрунта для проведения испытаний механических свойств по глубине, были вскрыты уступы грунта с площадкой 1x1 м и глубиной до 1,0 м. Исследованы срезы на трех участках с преобладанием: мерзлотно-палево-бурых почв с супесчаной грунтовой основой; перегнойно-карбонатных почв с суглинистой основой; кризёмных глеевых почв с глинистой основой. Измерение температуры грунта проводили вблизи поверхности уступа почвенным электронным термометром HI 98501 Hanna (Германия) с разрешением 0,1°C и погрешностью ±0,3°C. При помощи проникающего зонда термометра в контрольных отверстиях по глубине уступа с шагом 0,1 м измеряли значение температуры по мере увеличения глубины.

Ключевые слова: мерзлотные почвогрунты, прочностные свойства, лесные машины, лесозаготовки, экспериментальные исследования

EXPERIMENTAL RESULTS OF THE TEMPERATURE EFFECT OF CRYOLITHOZONE SOILS ON THEIR PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

PhD (Engineering) **S.E. Rudov**¹
DSc (Engineering), Professor **B.Y. Shapiro**²
DSc (Engineering), Professor **I.V. Grigoryev**³
DSc (Engineering), Professor **O.A. Kunitskaya**³
PhD (Agriculture), Associate Professor **O.I. Grigoryeva**²
DSc (Engineering), Associate Professor **T.N. Starodubtseva**⁴

1 – Federal State Military Educational Institution of Higher Education "Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S.M. Budienny", St. Petersburg, Russian Federation

2 – FSBEI HE "St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov",
St. Petersburg, Russian Federation

3 – FSBEI HE "Arctic State Agrotechnological University", Yakutsk, Russian Federation

4 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

Establishing the regularities of the temperature influence of frozen soils on their physical and mechanical properties makes it possible to make more accurate estimates of the parameters of the interaction process of forest machines and skidding systems with the soil mass when performing logging operations with predetermined static loads. An adequate assessment of the state of the edge part of frozen soil mass is the basis for the formation of initial conditions when calculating the parameters of the destruction of the stress-deformed frozen soil layer, the processes of its compaction and deformation under the influence of static loads arising from the operation of various forest machines and skidding systems. The article presents methodology, hardware and the results of data processing obtained in field experimental studies to determine the effect of frozen soil temperature on its strength and deformation properties. To reveal the regularities of the change in soil temperature in depth, as well as in order to take soil samples for testing the mechanical properties in depth, soil benches with an area of 1×1 m and a depth of up to 1.0 m were opened. Sections were investigated in three areas with a predominance of: permafrost pale brown soils with sandy loam soil base; humus-carbonate soils with a loamy base; cryozem gley soils with a clay base. Soil temperature was measured near the ledge surface with a HI 98501 Hanna soil electronic thermometer (Germany) with a resolution of 0.1°C and an error of ± 0.3°C. The temperature value was measured as the depth increased with the help of a penetrating thermometer probe in the control holes along the depth of the ledge with a step of 0.1 m.

Keywords: permafrost soils, strength properties, forest machines, logging, experimental research

Введение

Лесные машины работают в разнообразных почвенно-грунтовых условиях, в том числе – на мерзлотных почвогрунтах. Для разработки и реализации математических моделей, прогнозирующих показатели взаимодействия движителей машин с опорными поверхностями, необходимы сведения об их свойствах.

Натурные экспериментальные исследования являются одним из наиболее распространенных

методов научного проникновения при изучении процессов и взаимосвязей в лесозаготовительном производстве. Это касается и исследований в области экологической эффективности лесозаготовительного производства, воздействия лесных машин на почвогрунты лесосек. Отечественными и зарубежными учеными выполнено большое количество работ в этой области, [1]. Но теоретическое и экспериментальное изучение взаимодействия лесных машин с почвогрунтами криолитозоны проводится

участниками научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» впервые. Ранее работ в этой области при направленном информационном поиске выявить не удалось.

Материалы и методы

Параметр температуры (T) почвогрунта можно отнести к определяющим факторам состояния системы взаимодействия движителя лесной машины с близлежащим слоем массива.

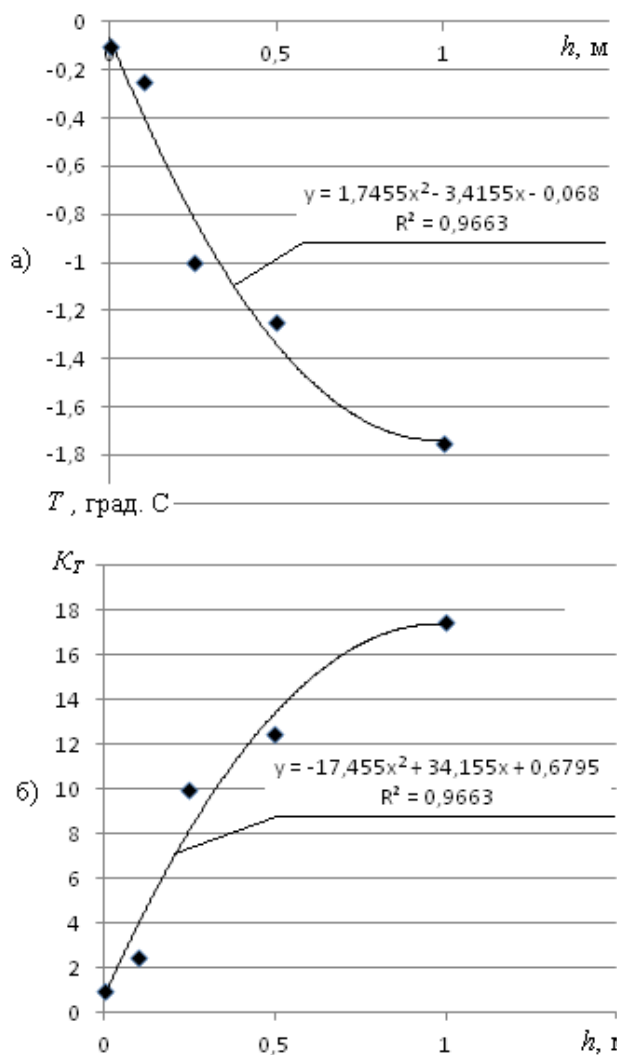


Рис. 1. Понижение температуры грунта с ростом глубины его залегания

Источник: собственные измерения и вычисления

Фундаментальные исследования состояния различных мерзлых грунтов представлены в ряде работ, например, в [2]. В частности, на рис. 1 а на основе обобщения опытных данных [2] для мерзлых грунтов в районе Амдермы при установлении нормативных значений нагрузок представлен гра-

фик изменения величины температуры грунта T с глубиной (h) залегания близлежащего его слоя.

С высокой степенью достоверности (коэффициент детерминации R^2 превышает уровень 0,96) зависимость на рис. 1, а описывается многочленом (полиномом) второй степени, при этом в диапазоне глубин h от 0 до 0,5 м понижение температуры T происходит практически линейно.

Необходимо отметить, что мощность мерзлого слоя почвогрунтов в ряде случаев может достигать 2 и более метров, в связи с чем процесс контактного взаимодействия лесных машин и трелевочных системы реализуется в пределах указанной мощности.

Зависимость $K_T(h)$ также с высоким коэффициентом детерминации ($R^2=0,9663$) можно представить как полином:

$$K_T(h)=-17,455h^2+34,155h+0,6795. \quad (1)$$

Для выявления закономерностей изменения температуры почвогрунта по глубине, а также с целью отбора проб почвогрунта для проведения испытаний механических свойств по глубине, были вскрыты уступы грунта с площадкой 1x1 м и глубиной до 1,0 м.

Образцы почвогрунтов для исследований отобраны в условиях ГКУ РС(Я) «Колымское лесничество». Для лесничества характерен резко-континентальный климат с холодной продолжительной зимой и коротким, сравнительно тёплым летом. Колебания температуры составляют более 90 °С, а среднегодовая температура отрицательная (-11,7 °С), отсюда и повсеместное распространение вечной мерзлоты. Безморозный период составляет всего 70-80 дней, но и в это время могут быть заморозки, поэтому вегетационный период очень короткий, что обуславливает замедленный рост древесно-

В условиях зоны многолетней мерзлоты процессы почвообразования осложняются присутствием близко залегающей многолетней мерзлоты и сезонными процессами промерзания и оттаивания. В нашем исследовании изучены закономерности изменения температуры по глубине залегания и физико-механические свойства трех типов почв, характерных для района проведения опытов, это:

Мерзлотно-палево-бурые почвы; Перегнойно-карбонатные почвы; Криозёмы глеевые.

Палево-бурые почвы (рис. 2) занимают значительную площадь северной тайги, такие почвы уникальны и встречаются лишь в Якутии. Полигоны плоские или выпуклые, имеют высоту 10-20 см, диаметр варьирует от 40-80 см до 1-2 м. Почвы оттаивают за лето на 1,0-1,5 м. Морфологический профиль отличается слабой дифференциацией на генетические горизонты с монотонной палево-коричневой окраской, но в нём заметна аккумуляция гумуса и органики. По гранулометрическому составу это супесчаные и легкосуглинистые почвы. Основной характерной чертой является наличие ясно выраженного подвешенного, светлоокрашенного карбонатного горизонта, реже карбонаты залегают в нижней части профиля.

Перегнойно-карбонатные почвы (рис. 3) формируются по высоким частям водоразделов в автоморфных условиях на элювии карбонатных пород под лиственничными редколесьями в условиях хорошего внутрипочвенного дренажа, профиль этих почв характеризуется сильной мерзлотной деструктивностью, слабой оглеённостью и карбонатностью всей минеральной части. Глубина сезонного протаивания до 70-80 см. По гранулометрическому составу это средне- и тяжелосуглинистые почвы, они имеют равномерное распределение илистых частиц по всему профилю. Почвы содержат в верхних горизонтах большое количество грубого перегноя, потеря при прокаливании составляет до 40-70 %. Содержание гумуса довольно высокое по всему профилю: 6-10 % в верхних, 2-4 % в нижних горизонтах.

Криозёмные глеевые почвы (рис. 4), как правило, характерны для равнинных территорий, где они формируются в условиях затрудненного дренажа (застойного увлажнения) на породах суглинистого и глинистого механического состава при постоянном присутствии в почвенном профиле мерзлотного льдистого горизонта на небольшой глубине.



Рис. 2. Срез мерзлотной палево-буровой почвы
Источник: собственные измерения и вычисления



Рис. 3. Срез перегнойно-карбонатной почвы
Источник: собственные измерения и вычисления

Профиль их состоит из влажной подстилки из опада хвои, листьев, лишайников и мхов. Горизонт рыхлый, побуревший, ниже расположен тёмно-бурый органогенный горизонт небольшой мощности, оторфованный или торфянисто-перегнойный, затем в надмерзлотном горизонте следует минеральная часть в той или иной степени оглеения.

Для выявления закономерностей изменения температуры почвогрунта по глубине, а также с целью отбора проб почвогрунта для проведения

испытаний механических свойств по глубине, были вскрыты уступы грунта с площадкой 1x1 м и глубиной до 1,0 м.

Исследованы срезы на трех участках с преобладанием:

1. мерзлотно-палево-бурые почвы с супесчаной грунтовой основой (экспериментальные срезы №1-№3);

2. перегнойно-карбонатные почвы с суглинистой основой (экспериментальные срезы №4-№6);

3. криозёмные глеевые почвы с глинистой основой (экспериментальные срезы №7-№9).



Рис. 4. Срез криозёмной глеевой почвы
Источник: собственные измерения и вычисления

Измерение температуры грунта проводили вблизи поверхности уступа почвенным электронным термометром HI 98501 Hanna (Германия) с разрешением 0,1 °C и погрешностью ±0,3 °C.

Далее, при помощи проникающего зонда термометра в контрольных отверстиях по глубине уступа с шагом 0,1м замеры значения температуры T по мере увеличения глубины z . При фиксированном значении h величину T измеряли до 10 раз.

В таблице 1 представлены средние значения температуры почвогрунта в контрольных точках.

Результаты замеров для срезов мерзлотно-палево-бурой почвы с супесчаной грунтовой основой проиллюстрированы графиками на рис. 5–7. В качестве теоретических данных выступают обобщенные опытные данные [2].

Таблица 1

Результаты измерения температуры грунта по глубине массива (экспериментальные срезы №1-№3, мерзлотно-палево-бурая почва с супесчаной грунтовой основой)

z, м	№1		№2		№3	
	T	S	T	S	T	S
0,0	0,49	0,0567	-0,10	0	-0,61	0,0875
0,1	0,36	0,0516	-0,23	0,0483	-1,23	0,0948
0,2	0,20	0	-0,40	0,0471	-1,26	0,0966
0,3	0,05	0,0527	-1,06	0,1075	-1,40	0,1885
0,4	-0,10	0	-1,15	0,0971	-1,57	0,1337
0,5	-0,25	0,0527	-1,27	0,11595	-1,67	0,2263
0,6	-0,39	0,0316	-1,29	0,0994	-1,76	0,0699
0,7	-0,60	0,0471	-1,47	0,1418	-1,74	0,2011
0,8	-1,13	0,156	-1,66	0,1897	-1,89	0,1728
0,9	-1,39	0,179	-1,67	0,1159	-2,00	0,1563
1,0	-1,33	0,156	-1,69	0,0994	-2,03	0,2451

(Примечание: здесь и далее S – стандартное выборочное отклонение экспериментальной величины)

Анализ полученных графических данных показывает, что температура мерзлой и оттаивающей мерзлотно-палево-бурой почвы с супесчаной грунтовой основой изменяется по глубине в соответствии с квадратичным полиномиальным законом, причем согласование экспериментальных данных с результатами аппроксимации весьма высокое ($R^2 > 0,9$).

Результаты и обсуждения

Полученная на основе экспериментальных данных зависимость изменения коэффициент K_{T_3} интенсивности понижения температуры с ростом глубины h представлена в виде полинома второй степени:

$$K_{T_3}(h) = -15,909h^2 + 32,682h + 0,1273, \quad (2)$$

что при сравнительном анализе с аналогичной зависимостью $K_T(h)$ (1), позволяет сделать некоторые выводы.

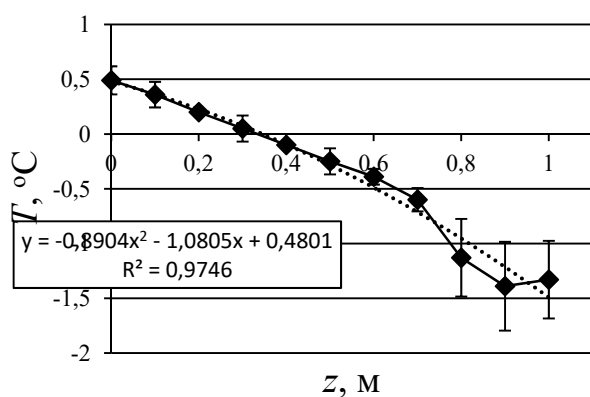
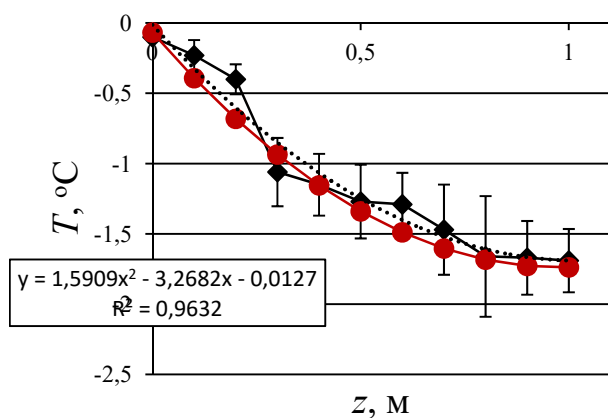
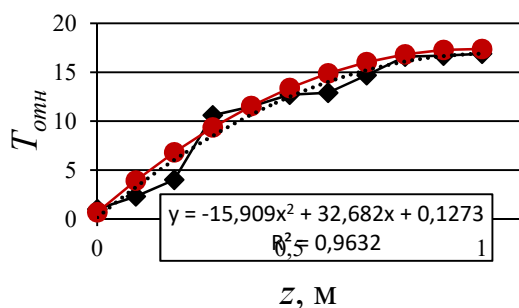


Рис. 5. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез №1)
Источник: собственные измерения и вычисления



● теор.

Рис. 6. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез №2)



● теор.

Рис. 7. Относительное изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез №2)

Источник: собственные измерения и вычисления

Во-первых, отличие коэффициентов полиномов при старшей степени переменной h не превышает 10 %, а при первой степени – 5%, что свидетельствует о достоверности опытных данных и их сопоставимости с теоретическим обобщением [3].

Во-вторых, кривые $K_T(h)$ и $K_{T_3}(h)$ являются эквидистантными (равноудаленными), что качественно подтверждает их принадлежность к одной природе физической закономерности изменения температуры мерзлого грунта с глубиной его залегания.

Базируясь на зависимости (1) в работах авторов [4, 5 и ряда других] установлены закономерности взаимодействия лесных машин и трелевочных систем с мерзлыми почвогрунтами с различными прочностными и упругопластическими свойствами.

Это обстоятельство обусловило необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований по установлению влияния параметра T на прочностные и деформационные свойства мерзлого почвогрунта.

В результате изучения состояния уступов мерзлотно-палево-бурого почвогрунта с супесчаной грунтовой основой (экспериментальные срезы №1-№3) было установлено, что температура замерзания почвогрунта составляет в среднем – 0,6 °С.

В табл. 2 приведены результаты испытаний образцов почвогрунта на сжатие при температуре вблизи границы замерзания.

В табл. 2 обозначено: сила сжатия P , напряжения сжатия σ , деформация сжатия h_c , модуль деформации E .

В табл. 3 представлены сводные данные по прочности мерзлых почвогрунтов на сжатие $\sigma_{сж}$, а в табл. 4 – оценки модуля E деформации мерзлых почвогрунтов при сжимающей нагрузке вблизи предела прочности.

Данные табл. 3 и 4 нагляднее проиллюстрировать графиками, которые представлены на рис. 8 и 9.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что по мере понижения температуры, начиная с точки замерзания, модуль

деформации и предел прочности почвогрунта на сжатие существенно увеличиваются.

Таблица 2
Результаты испытаний мерзлого почвогрунта на сжатие (опыт №1, супесчаная основа)

P, кН	σ, МПа	h _c , мкм		E, МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	-	-
0,1	0,051	94,1	5,63	81,59	5,055
0,2	0,102	184,8	10,10	83,04	4,731
0,3	0,153	276,9	19,84	83,30	6,298
0,4	0,204	362,3	19,21	84,69	4,703
0,5	0,255	451,8	24,34	84,89	4,669
0,6	0,306	539,0	36,91	85,53	6,003
0,7	0,357	608,7	29,94	88,17	4,386
0,8	0,407	689,6	35,09	88,96	4,617
0,9	0,458	762,7	31,73	90,21	3,700
1,0	0,509	880,1	49,65	87,01	4,993
1,1	0,560	921,0	35,97	91,33	3,494
1,2	0,611	1029,9	43,66	89,13	3,630
1,3	0,662	1044,0	36,07	95,21	3,290
1,4	0,713	1171,2	68,59	91,61	5,331
1,5	0,764	1201,0	73,57	95,75	5,627
1,6	0,815	1242,2	81,35	98,79	6,451
1,7	0,866	1356,5	65,88	95,98	4,646
1,7	0,866	1356,5	65,88	95,98	4,646
1,8	0,917	1460,9	63,05	94,33	4,115

(Примечание: здесь и далее M – среднее значение)

Разрушение:

	M	S
P _{разр.} , кН	1,87	0,0754
σ _{сж.разр.} , МПа	0,953	0,0380
E, МПа	89,40	6,780

Источник: собственные измерения и вычисления

Для почвогрунта с супесчаной и суглинистой основой снижение температуры на -1 °C от точки замерзания приводит к 2-4-х кратному повышению

механических характеристик, для почвогрунта с глинистой основой отмечается повышение механических характеристики на порядок.

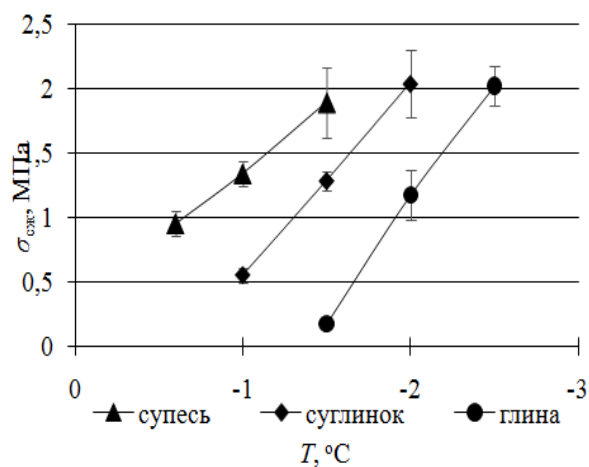


Рис. 8. Предел прочности на сжатие [МПа] образцов мерзлого почвогрунта (сводные данные)
Источник: собственные измерения и вычисления

Таблица 3
Предел прочности на сжатие [МПа] образцов мерзлого почвогрунта (сводные данные)

T, °C	Мерзлотно-палево-бурые почвы с супесч. грунт. основой (срезы №1-№3)		T, °C	Перегнойно-карбонат. почвы с суглинист. основой (срезы №4-№6)		T, °C	Криозёмные глеевые почвы с глинист. основой (срезы №7-№9)	
	Средн.	Δ		Средн.	Δ		Средн.	Δ
-0,6	0,9527	0,095	-1	0,5518	0,0575	-1,5	0,1727	0,03
-1	1,34	0,1	-1,5	1,2829	0,0725	-2	1,1732	0,195
-1,5	1,8893	0,2725	-2	2,0372	0,2575	-2,5	2,0181	0,15

Таблица 4
Модуль деформации [МПа] образцов мерзлого почвогрунта (сводные данные)

T, °C	Мерзлотно-палево-бурые почвы с супесч. грунт. основной (срезы №1-№3)		T, °C	Перегнойно-карбонатные почвы с суглинист. основной (срезы №4-№6)		T, °C	Криозёмные глеевые почвы с глинист. основной (срезы №7-№9)	
	Средн.	Δ		Средн.	Δ		Средн.	Δ
-0,6	89,4	16,95	-1	55,9	10,35	-1,5	33,8	9,225
-1	135,4	26,2	-1,5	96	21,175	-2	57	16,525
-1,5	177,5	33,45	-2	126,8	30,875	-2,5	76,1	28,075

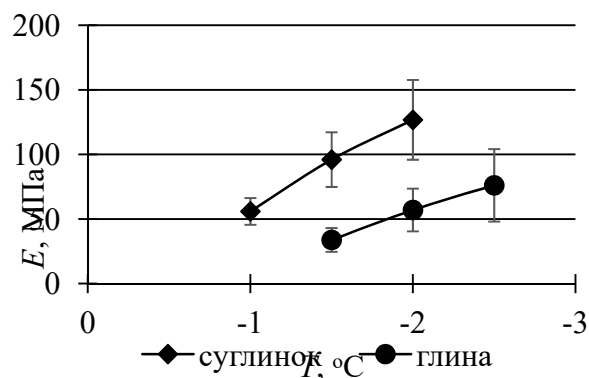


Рис. 9. Модуль деформации [МПа] образцов мерзлого почвогрунта (сводные данные)

Источник: собственные измерения и вычисления

Сравним полученные результаты с обобщенными данными [2]. Для мерзлой супеси обработка данных [2] позволила получить зависимость коэффициента интенсивности роста величины $\sigma_{сж}$ по мере понижения температуры T:

$$K_{сж}(T) = -0,0468T^2 - 1,075T - 0,0585. \quad (3)$$

Аналогично для модуля деформации E получен полином:

$$K_E(T) = -0,545T^2 - 3,0435T + 0,0015. \quad (4)$$

Обработка данных таблиц 3 и 4 для мерзлой супеси (рис. 10: ось ординат – безразмерные коэффициенты интенсивности) и полученные при этом полиномы аппроксимации позволяют произвести следующий сравнительный анализ.

Для оценки роста модуля деформации сходимость экспериментальных данных и данных обобщения [3] не превышает 30 %.

Для оценки предела прочности на сжатие полиномиальные коэффициенты при T^2 расходятся существенно. Однако надо иметь в виду, что зависимость (3) установлена для диапазона изменения T от -0,1 до -10°C, т.е. для достаточно больших по модулю значений T. При диапазоне изменения T в ходе проведенных экспериментов от -0,5 до -1,5°C коэффициенты, существенно меньшие 1, при старшей степени полинома обеспечивают незначительный вклад в произведенные оценки. При этом полиномиальные коэффициенты при первой степени T (-1,075 в формуле (3) и -1,0417 в полиноме аппроксимации графика 2 на рис. 10) отличаются в допустимых пределах.

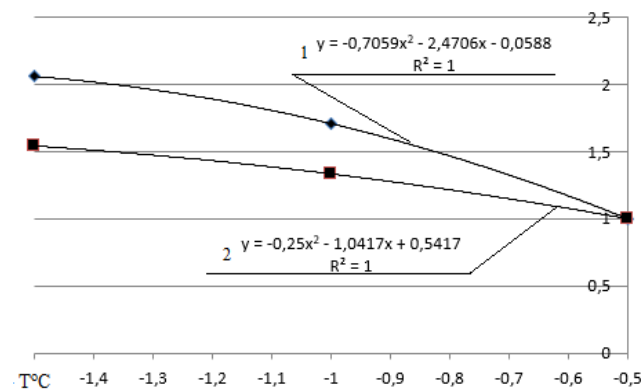


Рис. 10. Влияние температуры мерзлого почвогрунта на интенсивность роста показателей деформации и прочности: 1 – E, 2 – $\sigma_{сж}$

Источник: собственные измерения и вычисления

Выводы

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования по оценке влияния температуры мерзлого грунта на физико-механические, деформационные и прочностные его свойства являются дополнительным аргументом правомерности и адекватности разработанных в [4-7 и ряда

других] математических моделей взаимодействия лесных машин и трелевочных систем с краевой частью массива в пределах трассы волока. Полу-

ченные данные не противоречат данным иностранных коллег [8-12].

Библиографический список

1. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных машин / И. В. Григорьев, В. А. Макуев, А. И. Никифорова [и др.] // Вестник московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2014. – № S2. – С. 36–41.
2. Долматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Б. И. Долматов. – Санкт-Петербург : Стройиздат, 1988. – 416 с.
3. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2019. – № 1 (367). - С. 106–119. – DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106.
4. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 3 (39). – С. 73–78. – DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-73-78.
5. Особенности взаимодействия трелевочных систем с оттаивающим почвогрунтом / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2019. Т. 23. – № 1. – С. 52–61. – DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-52-61.
6. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds / S. Rudov, V. Shapiro, I. Grigorev [et al.] // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – Т. 10. – № 1. – С. 2052–2071.
7. Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and thawing soil grounds / S.E. Rudov, I.V. Grigorev, O.A. Kunitskaya [et al.] // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2019. – Т. 28. – № 9. – С. 179–197.
8. Maclaurin, E. B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres. *Proceedings of the 10th International ISTVS Conference*, Kobe, Japan, August 20-24, 1990. I: 177-186.
9. Rohani B., Baladi G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981, 41 p.
10. 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. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 28 p.
11. Vesic A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, № 98, 1972, pp. 113-123.
12. Wismer R.D., Luth H. J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Transaction ASAE* 17(1), 1973. 8-10, 14 pp.

References

1. Grigor'ev, I.V. Issledovanie koefefficienta soprotivlenija peredvizheniju kolesnyh lesnyh mashin [Studies of rolling resistance coefficient of wheeled forestry machines]/ I.V. Grigor'ev, V.A. Makuev, A.I. Nikiforova, E.G. Khitrov, V.V. Ustinov, S.Ju. Kalinin // Vestnik MGUL -Lesnoj vestnik [Herald MSFU - Forestry Gazette]. 2014. # S2. 36-41 pp.
2. Dolmatov B. I. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty [Soil Mechanics, foundations and foundations]/ B. I. Dolmatov. St. Petersburg, Stroyizdat. 1988. -416 p.

3. Rudov S.E. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty [Features of contact interaction of the skidding system with frozen soil] / S.E. Rudov, V.YA. Shapiro, I.V. Grigorev, O.A. Kunickaya, O.I. Grigoreva // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest magazine]. 2019. № 1 (367). - 106-119 pp. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106.

4. Rudov S.E. Matematicheskoe modelirovanie processa uplotneniya merzlogo pochvogrunta pod vozdejstviem lesnyh mashin i trelevochnyh sistem [Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of forest machines and skidding systems] / S.E. Rudov, V.YA. Shapiro, I.V. Grigorev, O.A. Kunickaya, O.I. Grigoreva // Sistemy. Metody. Tekhnologii [The system. Methods. Technologies]. 2018. № 3 (39). - С. 73-78 pp. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-73-7.

5. Rudov S.E. Osobennosti vzaimodejstviya trelevochnyh sistem s ottaivayushchim pochvogruntom [The peculiarities of interaction between the systems of the thawing soil]. / S.E. Rudov, V.YA. Shapiro, I.V. Grigorev, O.A. Kunickaya, O.I. Grigoreva // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin [Forest Bulletin. Forestry Bulletin]. 2019. Т.23. №1. 52-61 pp. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-52-61.

6. Rudov S. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds / S. Rudov, V. Shapiro, I. Grigorev, O. Kunitskaya, V. Druzyanova, G. Kokieva, A. Filatov, M. Sleptsova, A. Bondarenko, D. Radnaed // International Journal of Civil Engineering and Technology. - 2019. Т. 10. № 1. - 2052-2071 pp.

7. Rudov S.E. Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and thawing soil grounds / S.E. Rudov, I.V. Grigorev, O.A. Kunitskaya, N.A. Ivanov, L.V. Kremleva, O.D. Myuller, E.F. Gerts, Yu.M. Chemshikova, E.V. Teterevleva, A.V. Knyazev // International Journal of Advanced Science and Technology. - 2019. Т. 28. № 9. - 179-197 pp.

8. Maclaurin E. B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres. Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, August 20-24, 1990. I: 177-186 pp.

9. Rohani, B., Baladi, G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981, 41 p.

10. 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. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 28 p.

11. Vesic, A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, № 98, 1972, 113 – 123 pp.

12. Wismer R.D., Luth, H. J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. Transaction ASAE 17(1), 1973. 8-10,14 pp.

Сведения об авторах

Рудов Сергей Евгеньевич – старший преподаватель кафедры № 3 ФГКВБОУ ВПО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: ntobumdrevprom@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: silver73@inbox.ru.

Шапиро Владимир Яковлевич – профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Григорьева Ольга Ивановна – доцент кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: grigoreva_o@list.ru.

Стородубцева Тамара Никаноровна – заведующий кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tamara-tns@yandex.ru

Information about the authors

Rudov Sergey Evgenyevich – senior lecturer, Department No. 3, Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny military Academy of communications, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: ntobum-drevprom@mail.ru.

Grigoryev Igor Vladislavovich – Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex" of the Arctic state agrotechnological University, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru.

Shapiro Vladimir Yakovlevich – Professor of the Department of Higher mathematics, Saint Petersburg state forest engineering university named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Kunitskaya Olga Anatolyevich – Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex" of the Arctic state agrotechnological university, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Grigoryeva Olga Ivanovna – Associate Professor of the Department of Forestry, Saint Petersburg state forest engineering University named after S. M. Kirov, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: grigoreva_o@list.ru.

Storodubtseva Tamara Nikanorovna – head of the Department of Industrial transport, construction and geodesy, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: tamara-tns@yandex.ru.