

УДК 624.131.37:624.131.43

**ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКУССТВЕННО
ПРИГОТОВЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ОТТАИВАНИИ****Вахрин И.С., Кузьмин Г.П.***ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск,
e-mail: VakhLIG2010@yandex.ru, kuzmin@mpi.ysn.ru*

Статья посвящена процессу осадки мёрзлых грунтов при оттаивании, закономерности протекания которого необходимы для решения задачи обеспечения устойчивости зданий и инженерных сооружений, возводимых с использованием мёрзлых грунтов основания в оттаявшем состоянии или допущением оттаивания в период эксплуатации. В современных условиях потепления климата изучение осадки мёрзлых грунтов при оттаивании становится очень важным. В настоящее время отсутствует база данных о деформационных характеристиках оттаивающих грунтов и не установлены зависимости их от основных показателей физических свойств мёрзлых грунтов. В связи с этим целью исследования является определение коэффициентов оттаивания и сжимаемости мёрзлых грунтов при оттаивании и выявление зависимости их от физических характеристик различных типов грунтов. В результате определения гранулометрического состава исследуемых грунтов ситовым и ареометрическим анализом, грунты представлены в виде песка мелкого, супеси пылеватой и суглинка лёгкого пылеватого. Излагается методика приготовления образцов грунта для определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов методом компрессионного сжатия. Приведены физические характеристики трёх типов исследованных грунтов и результаты определения коэффициентов оттаивания и сжимаемости их. Установлены зависимости коэффициентов оттаивания и сжимаемости исследуемых грунтов в диапазоне влажности от 0 до полной влагоёмкости при постоянных значениях пористости. На основе регрессионного анализа полученных значений деформационных характеристик получены зависимости их от влажности превышающих полную влагоёмкость в супеси и суглинке, которые линейно повышаются и от пористости. Установлено, что изменение деформационных характеристик при изменении пористости выражается одной зависимостью.

Ключевые слова: грунт, оттаивание, компрессионные испытания, физические характеристики, деформационные характеристики

**THAW DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ARTIFICIALLY
PREPARED FROZEN SOIL SAMPLES****Vakhnin I.S., Kuzmin G.P.***Melnikov Permafrost Institute SB, Yakutsk, e-mail: VakhLIG2010@yandex.ru, kuzmin@mpi.ysn.ru*

This article addresses the problem of thaw settlement of permafrost soils. Understanding how this process proceeds is necessary to solve building stability problems when the foundations are used either in a thawed state or designed to provide for thaw penetration during the service life of the structure. With on-going climate warming, research on thaw settlement becomes increasingly important. However, no databases are presently available on thaw strain characteristics of frozen soils, and no relationships to the main physical properties have been obtained as yet. The purpose of this study is to determine the coefficients of thawing and compressibility of frozen soils, as well as to relate them to physical properties of various soil types. The study soils are fine sand, silty sand, and sandy silt, as defined by grain-size analyses with the sieve and hydrometer methods. A sample preparation procedure is presented for consolidation tests performed to determine thaw deformation characteristics. The physical properties, as well as the coefficients of thawing and compressibility obtained for the three soil types are given. The relationships for the thawing and compressibility coefficients are presented which have been established over the range of moisture contents from 0 to full saturation at a constant porosity. Based on the regression analysis of the deformation characteristics, their relationships to moisture content for oversaturated silty sand and sandy silt which increase linearly, as well as to porosity are shown. The results indicate that variation of the deformation characteristics with porosity is expressed with a single relationship.

Keywords: soil, thawing, compression tests, physical characteristics, deformation characteristics

Мёрзлые дисперсные грунты под действием собственной массы и приложенной нагрузки при оттаивании уменьшаются в объёме [1]. Осадка мёрзлых грунтов основания при оттаивании, особенно неравномерная, приводит к деформациям и разрушениям зданий и сооружений [2]. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов выражаются коэффициентом оттаивания, определяющим осадку мёрзлых грунтов при оттаивании под действием соб-

ственной массы грунта, и коэффициентом сжимаемости, определяющим осадку оттаявшего грунта под действием приложенной внешней нагрузки. Они используются для расчёта осадки оттаивающих грунтов основания сооружений, возводимых с предварительным оттаиванием или допущением оттаивания в период строительства и последующей эксплуатации сооружений (принцип II). Изучение осадки мёрзлых грунтов при оттаивании в условиях потепления

климата становится ещё более актуальным. Коэффициенты оттаивания и сжимаемости определяются в компрессионном приборе в условиях невозможности бокового расширения образца грунта [3]. Принимается, что грунты в массиве находятся также в подобных условиях. Величины этих коэффициентов зависят от состава и строения мёрзлых грунтов. Поэтому при изучении деформационных свойств оттаивающих мёрзлых грунтов определяют их физические характеристики. Для обеспечения однородности состава и строения грунтов исследования проводились на искусственно приготовленных образцах.

Целью исследования является установление зависимости деформационных характеристик оттаивающих грунтов от их физических свойств. Эти зависимости необходимы при решении задачи обеспечения устойчивости зданий и сооружений, возводимых с использованием грунтов основания по принципу II. В условиях потепления климата это требование становится ещё более важным.

Материалы и методы исследования

Деформационные характеристики оттаивающих грунтов изучались на искусственно приготовленных образцах с различной заданной влажностью трёх основных типов

дисперсных грунтов – песка, супеси и суглинка. В табл. 1 приведены результаты определения гранулометрического состава исследованных грунтов ситовым и ареометрическим анализом [4–6] и минералогического состава иммерсионным методом [7].

Подготовка образцов грунта для определения физических и деформационных характеристик оттаивающих грунтов выполнялась следующим образом. Отобранный для испытания грунт высушивали при температуре 105 °С до установления постоянной массы. Часть высушенного грунта использовалась для определения по стандартной методике плотности твёрдых частиц. Расчёт её производился по формуле

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_d}, \quad (1)$$

где m_d – масса образца высушенного грунта; V_d – объём твердых частиц.

Другой частью высушенного грунта наполняли кольцо компрессионного прибора [8]. Кольцо с грунтом взвешивали и находили начальную плотность сухого образца по формуле

$$\rho_{d0} = \frac{m_d}{V_0}, \quad (2)$$

где V_0 – начальный объём образца.

Таблица 1

Гранулометрический и минеральный состав исследованных грунтов

Наименование	Содержание частиц разного размера (мм) в %							Содержание минералов в %	
	2,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	< 0,002		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Песок мелкий	4,90	35,90	56,50	2,70	–	–	–	Кварц	41,20
								Полевые шпаты	56,40
								Биотит	0,60
								Обломки породы	1,80
Супесь пылеватая	–	0,40	2,20	26,70	60,40	4,70	5,60	Кварц	18,00
								Полевые шпаты	61,50
								Карбонаты	10,30
								Разрушенная слюда	7,30
								Обломки породы	2,90
Суглинок лёгкий пылеватый	–	0,30	1,30	15,80	53,20	16,70	12,70	Кварц	17,70
								Полевые шпаты	63,60
								Карбонаты	9,10
								Разрушенная слюда	3,60
								Обломки породы	6,00

По найденным значениям плотности твёрдых частиц и начальной плотности сухого грунта определяли начальную пористость образца по формуле

$$n_0 = \frac{\rho_s - \rho_{d0}}{\rho_s}. \quad (3)$$

Затем образец в кольце компрессионного прибора увлажняли. Необходимое количество воды для получения заданной влажности образца грунта определяли по формуле

$$m_b = m_d * w, \quad (4)$$

где w – влажность грунта.

После этого образец в кольце компрессионного прибора для равномерного распределения воды выдерживался при положительной температуре в течение 24 ч, затем его замораживали. Образец в процессе выдерживания в течение суток для равномерного распределения в нём воды замораживания и испытания в компрессионном приборе предохраняли от иссушения. Для контроля возможных потерь воды из образцов после компрессионных испытаний кольцо с образцом снова взвешивалось. При компрессионном сжатии грунта в условиях невозможности бокового расширения объём образца выражается зависимостью

$$V = S * (h - \Delta h), \quad (5)$$

где S – площадь поперечного сечения образца; Δh – деформация образца; h – начальная высота образца.

На основании (5) на ступенях компрессионного сжатия физические характеристики выражаются зависимостями:

– плотность сухого грунта [9]

$$\rho_d = \frac{\rho_{d0}}{1 - \frac{\Delta h}{h}}, \quad (6)$$

– пористость грунта [9]

$$n = 1 - \frac{\rho_{d0}}{\rho_s * \left(1 - \frac{\Delta h}{h}\right)}. \quad (7)$$

При изучении осадки мёрзлых грунтов при оттаивании важным показателем физических свойств грунтов является полная влагоёмкость, которая определяется по формуле

$$w_{sab} = \rho_w * \frac{\rho_s - \rho_{d0}}{\rho_s * \rho_{d0}}, \quad (8)$$

где ρ_w – плотность воды.

В диапазоне изменения влажности от 0 до полной влагоёмкости только плотность грунта зависит от влажности, остальные физические характеристики грунта остаются постоянными.

В табл. 2 представлены значения физических характеристик песка мелкого, супеси пылеватой и суглинка лёгкого пылеватого в талом состоянии.

Таблица 2

Основные физические характеристики исследованных грунтов в талом состоянии

№ п/п	w , %	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n , %	w_{sab} , д.е.	w_p , %	w_p , %	I_p , %	Наименование грунта
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	5,0	1,71	1,63	2,66	38,72	0,237	–	–	–	Песок мелкий
2	10,0	1,79								
3	15,0	1,87								
4	20,0	1,96								
5	23,7	2,02								
6	5,0	1,63	1,55	2,70	42,59	0,274	20,7	16,1	4,6	Супесь пылеватая
7	10,0	1,71								
8	15,0	1,78								
9	20,0	1,86								
10	27,4	1,97								
11	5,0	1,59	1,51	2,71	44,28	0,292	30,5	21,3	9,2	Суглинок лёгкий пылеватый
12	10,0	1,66								
13	15,0	1,74								
14	20,0	1,81								
15	25,0	1,89								
16	29,2	1,95								

Таблица 3

Физические и деформационные характеристики исследованных грунтов при оттаивании

№ п/п	Среднее значение по пяти определениям				Наименование грунта
	$w_{tot}, \%$	$n, \%$	$A_m, \text{ д.е.}$	$m, \text{ МПа}^{-1}$	
1	2	3	4	5	6
1	4,96	38,72	0,0149	0,0208	Песок мелкий
2	9,96	38,72	0,0147	0,0206	
3	14,98	38,72	0,0148	0,0206	
4	20,02	38,72	0,0149	0,0208	
5	23,50	38,72	0,0149	0,0209	
6	5,10	42,59	0,095	0,046	Супесь пылеватая
7	10,0	42,59	0,093	0,045	
8	15,0	42,59	0,097	0,046	
9	20,0	42,59	0,095	0,045	
10	27,2	42,59	0,098	0,046	
11	30,9	49,78	0,109	0,053	
12	35,3	53,11	0,101	0,056	
13	39,0	55,41	0,128	0,058	Суглинок лёгкий пылеватый
14	5,0	44,28	0,123	0,062	
15	10,0	44,28	0,123	0,062	Суглинок лёгкий пылеватый
16	15,0	44,28	0,124	0,062	
17	20,0	44,28	0,124	0,062	
18	25,0	44,28	0,123	0,063	
19	29,1	44,28	0,123	0,063	
20	35,0	53,07	0,145	0,074	
21	40,0	56,24	0,153	0,079	
22	45,0	59,04	0,162	0,085	

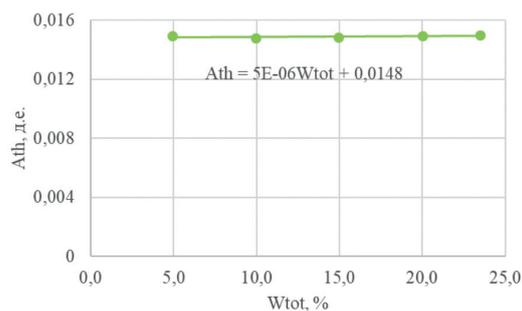
Образцы грунта в компрессионном приборе испытывались под ступенчато-возрастающими давлениями. На каждой ступени нагрузки определяли по принятой методике коэффициенты оттаивания и сжимаемости и по формулам (6) и (7) рассчитывали величины плотности сухого грунта и пористости.

Результаты исследования и их обсуждение

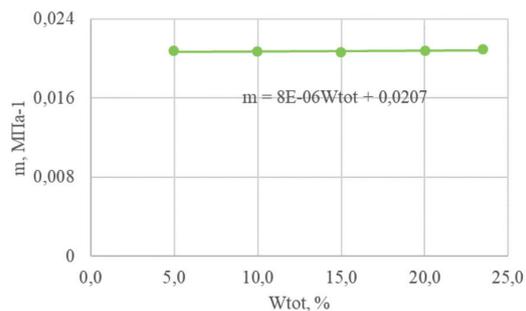
Результаты определений физических и деформационных характеристик, искусственно приготовленных образцов песка, супеси и суглинка при оттаивании приведены в табл. 3.

На рис. 1–5 представлены графики зависимости деформационных характеристик всех трёх типов исследованных грунтов от влажности и пористости. Влажность образцов песка изменялась в пределах диапазона от 0 до полной влагоёмкости w_{sab} , а супеси и суглинка от 0 до $w > w_{sab}$.

Величины коэффициентов оттаивания и сжимаемости всех трёх типов исследованных грунтов в диапазоне изменения влажности от 0 до полной влагоёмкости при одинаковой пористости, как и следовало ожидать, не изменяются (рис. 1, 2 и 4). При влажностях, превышающих полную влагоёмкость в супеси и суглинке (рис. 3 и 5), коэффициенты оттаивания и сжимаемости линейно повышаются с увеличением влажности грунта. Это вызвано раздвиганием частиц и увеличением пористости грунта при промерзании. На основе регрессионного анализа значений деформационных характеристик получены зависимости их от влажности и от пористости грунта. Как видно из рис. 3 и 5, изменение деформационных характеристик при изменении пористости грунта выражается одной зависимостью. Поэтому при изучении осадки мёрзлых грунтов при оттаивании рекомендуется пользоваться подобной зависимостью.

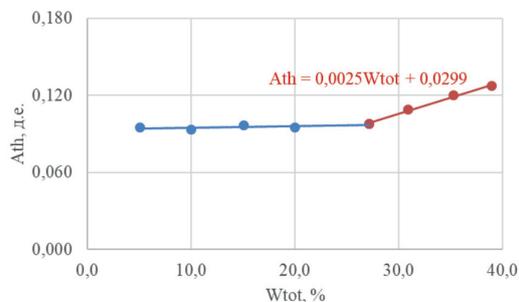


a)

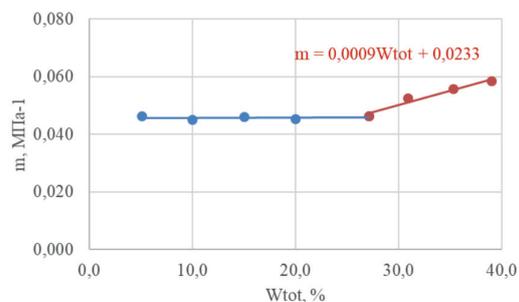


б)

Рис. 1. Зависимость коэффициентов оттаивания (а) и сжимаемости (б) песка мелкого в диапазоне влажности от 0 до полной влагёмкости при постоянном значении пористости, равном 38,72%

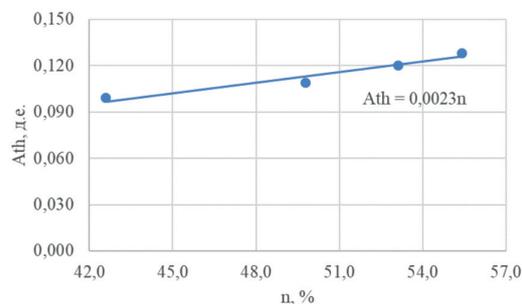


a)

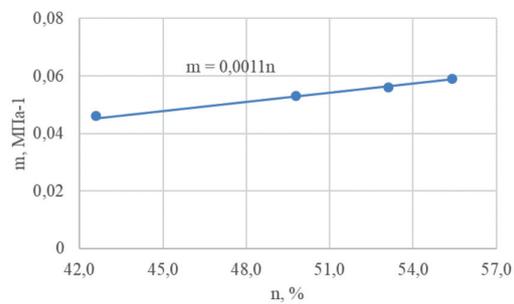


б)

Рис. 2. Зависимость коэффициентов оттаивания (а) и сжимаемости (б) супеси пылевой от влажности



a)



б)

Рис. 3. Зависимость коэффициентов оттаивания (а) и сжимаемости (б) супеси пылевой от пористости

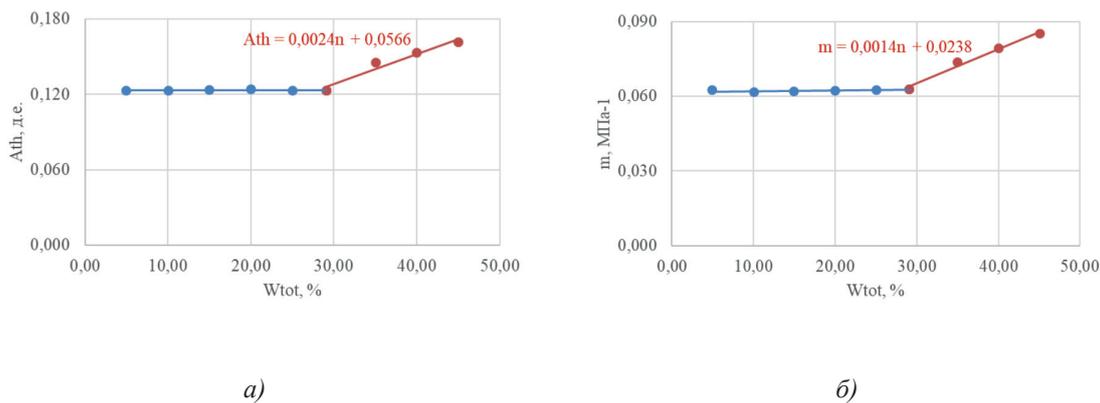


Рис. 4. Зависимость коэффициентов оттаивания (а) и сжимаемости (б) суглинка лёгкого пылеватого от влажности

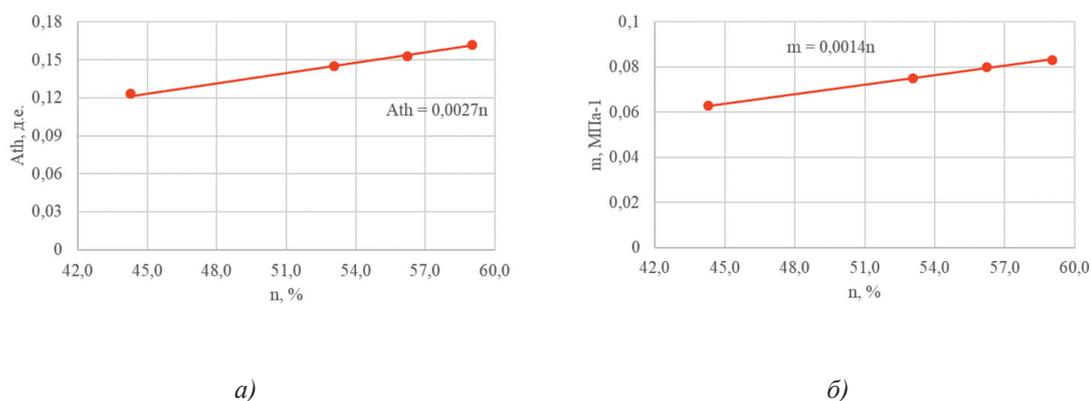


Рис. 5. Зависимость коэффициентов оттаивания (а) и сжимаемости (б) суглинка лёгкого пылеватого от пористости

Заключение

Изучение осадки мёрзлых дисперсных грунтов при оттаивании в современных условиях потепления климата приобретает все большее значение. Экспериментальными исследованиями установлены закономерности изменения деформационных характеристик трёх основных типов мёрзлых грунтов при оттаивании. Получены зависимости коэффициентов оттаивания и сжимаемости от влажности и пористости исследованных грунтов. Сделан вывод о том, что деформационные характеристики оттаивающих грунтов следует выражать в виде зависимости от пористости грунта.

Список литературы / References

1. Хрусталёв Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне: учебник. М.: ИНФРА-М, 2019. 543 с.

Khrustalev L.N. Fundamentals of geotechnics in permafrost: textbook. М.: INFRA, 2019-M. 543 p. (in Russian).

2. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мёрзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 1. С. 22–32.

Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Grebenets V.I. Changes of foundation bearing capacity due to climate warming in Northwest Siberia // Cryosphere earth. 2012. V. XVI. № 1. P. 22–32 (in Russian).

3. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2011. 162 с.

4. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Межгосударственный стандарт, 2013. 63 с.

5. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.

6. Трофимов В.Т., Вознесенский Е.А., Королёв В.А. Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России. М.: КДУ, 2011. 672 с.

Trofimov V.T., Voznesenskiy E.A., Korolev V.A. Engineering geology of Russia. Volume 1. Soils of Russia. М.: KDU, 2011. 672 p. (in Russian).

7. Ложкин В.В. Диагностика минералов россыпей. Практическое руководство. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1962. 243 с.

Lozhkin V.V. Diagnostics of Placer Minerals. Practical guide. M.: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane neдр, 1962. 243 p. (in Russian).

8. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. М.: ООО «Прондо», 2014. 812 с.

Boldyrev G.G. Methods for Determining the Mechanical Properties of Soils with Comments to GOST 12248-2010. M.: ООО Prondo, 2014. 812 p. (in Russian).

9. Вахрин И.С., Кузьмин Г.П. Намывные грунты в г. Якутске и определение физических их свойств на основе компрессионных испытаний // Успехи современного естествознания. 2019. № 7. С. 66–70. DOI: 10.17513/use.37161.

Vakhrin I.S., Kuzmin G.P. Hydraulic-fill soils in Yakutsk and determination of their physical properties from consolidation tests // Advances in current natural sciences. 2019. № 7. P. 66–70 (in Russian).