

УДК: 624.131.439

**Ю.В. Саенко, А.Л. Невзоров**

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
Архангельск, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛЕДНИКОВЫХ СУГЛИНКОВ**

Рассматриваются виды и методы определения деформационных характеристик глинистых грунтов в приборах компрессионного и трехосного сжатия и простого сдвига. В работе приводятся результаты определения секущего модуля сдвига и модуля сдвига при разрушении, одометрического и компрессионного модулей деформации, секущего модуля и модуля нагрузки-разгрузки. Результаты сопоставляются с рекомендациями нормативных документов.

**Ключевые слова:** ледниковые отложения, модуль деформации, модуль сдвига, модель упрочняющегося грунта.

**Yu.V. Saenko, A.L. Nevzorov**

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russian Federation

## **INVESTIGATION OF DEFORMATION PROPERTIES GLACIAL CLAYEY DEPOSITS**

The article deals with methods for determination of deformation properties of clays by direct simple shear, triaxial and consolidation tests. The article present results of determination of the secant and failure shear modulus, oedometer and Young's modulus, secant module and unloading-reloading module. The results are compared with the corresponding values in Russian Codes.

**Keywords:** glacial deposits, Young's modulus, shear modulus, Hardening Soil model.

### **Введение**

При численном моделировании объектов промышленного и гражданского строительства используются различные математические модели грунтов. При этом ряд характеристик грунтов, использующихся в сложных моделях, таких как модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil model), не определяется в ходе инженерно-геологических изысканий.

При расчете свайных фундаментов по деформациям согласно СП 24.13330.2011 используются две характеристики грунтов: модуль сдвига  $G$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ , первая из них вычисляется по зависимости, принимаемой из сопротивления материалов, как функция «модуля общей деформации», а вторая берется по справочным данным, в частности по СП 22.13330.2011.

Целью исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, было определение деформационных характеристик ледниковых суглинков, использующихся в качестве несущего слоя свайных фундаментов большинства зданий в г. Архангельске.

Материалы. Оборудование. Методики исследований

Особенностью ледниковых отложений г. Архангельска является наличие двух горизонтов – верхнего  $q_{III}^2$  и нижнего  $q_{III}^1$ , несколько отличающихся по свойствам.

Исследования выполнялись на образцах ненарушенной структуры двух названных горизонтов, отобранных из трех скважин с глубины 3,6–11,4 м и 13,8–17,5 м, соответственно. Было испытано по 8 образцов из каждого горизонта с начальной высотой 0,2–0,3 м, диаметром 168 мм. Обработка результатов испытаний для них велась отдельно. Физические свойства грунтов определялись по ГОСТ 5180-84, их значения приведены в табл. 1. Гранулометрический состав для частиц размером 0,1 мм и более определялся ситовым методом, для частиц размером менее 0,1 мм – пипеточным методом по ГОСТ 12536-79, результаты определений представлены на рис. 1.

Таблица 1

Значение физических характеристик ледниковых суглинков

Характеристики	Суглинки верхнего горизонта, $q_{III}^2$	Суглинки нижнего горизонта, $q_{III}^1$
Влажность, %	13,1–15,0 (среднее 14,2)	17,6–19,0 (среднее 18,3)
Плотность г/см <sup>3</sup>	2,22–2,27 (среднее 2,26)	2,08–2,15 (среднее 2,12)
Плотность частиц, г/см <sup>3</sup>	2,71–2,74 (среднее 2,72)	2,73–2,74 (среднее 2,73)
Влажность на границе пластичности, %	11,3–12,7 (среднее 12,1)	13,2–14,9 (среднее 14,0)
Влажность на границе текучести, %	18,0–21,9 (среднее 20,1)	25,5–32,1 (среднее 29,2)
Число пластичности, ед	0,08	0,15
Показатель текучести, ед	0,26	0,29
Коэффициент пористости	0,372	0,523

Исследования выполнялись в лаборатории механики грунтов ка-

федры инженерной геологии, оснований и фундаментов, оснащенной современными автоматизированными комплексами по испытанию грунтов (компания Geocomp Corporation, США). Схемы проведения испытаний и определяемые характеристики представлены в табл. 2.

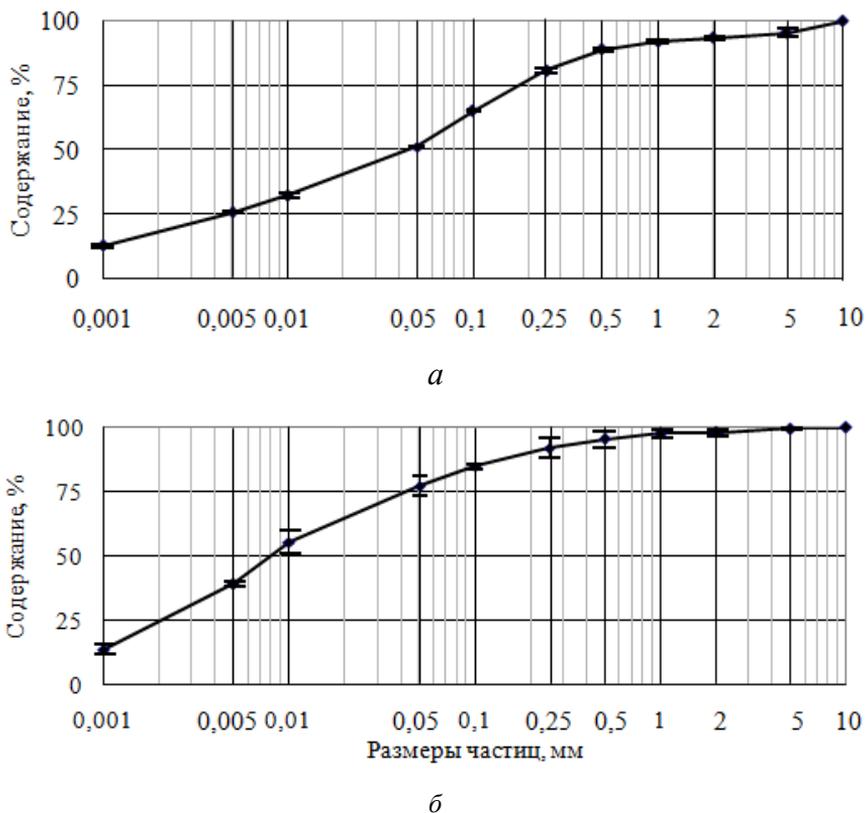
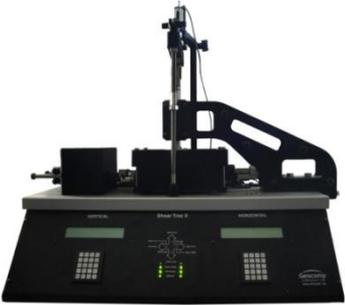
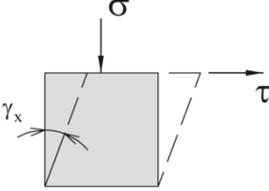
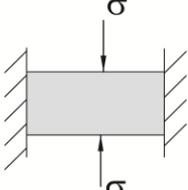
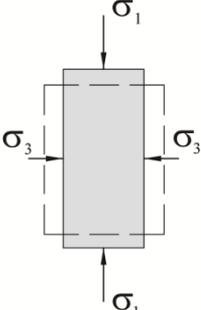


Рис. 1. Гранулометрический состав ледниковых отложений:  
 а – верхнего горизонта; б – нижнего горизонта

Испытания в условиях простого сдвига из-за отсутствия отечественных норм проводились по ASTM D3080-03. Образец грунта диаметром 73 мм и высотой 29 мм, заключенный в латексную оболочку и окруженный плоскими тефлоновыми кольцами, скашивался при перемещении верхнего штампа (рис. 2). Испытания проводились при трех значениях нормального давления – 100, 200 и 300 кПа. Штамп перемещался с постоянной горизонтальной скоростью 0,05 мм/мин. Критерием разрушения образца служила деформация сдвига, равная 20 % от диаметра образца.

Таблица 2

Методы определения характеристик грунтов

Тип испытаний	Прибор	Схема испытаний и определяемые характеристики
<p>Простой сдвиг (скашивание)</p>		 <p>Модуль сдвига при разрушении (<math>G_f</math>); Секущий модуль сдвига (<math>G_{50}</math>)</p>
<p>Компрессионное сжатие</p>		 <p>Одометрический модуль деформации (<math>E_{oed}</math>);</p>
<p>Трехосное сжатие</p>		 <p>Компрессионный модуль деформации (<math>E</math>);                  Секущий модуль деформации (<math>G_{50}</math>);                  Модуль нагрузки-разгрузки (<math>E_{ur}</math>);                  Коэффициент Пуассона (<math>\nu</math>);</p>

Испытания в условиях компрессионного сжатия для определения одометрического модуля выполнялись в соответствии с ГОСТ 12248-2010.

Размеры образца: диаметр 73 мм, высота 21 мм. Нагрузка прикладывалась ступенями по 20 до 300 кПа.

Испытания в стабилометрах проводились согласно ГОСТ 12248-2010. Предварительно образцы грунта консолидировали при первоначальном всестороннем давлении равном 100 кПа. Затем с шагом 20 кПа увеличивали вертикальную нагрузку. Для определения модуля нагрузки-разгрузки выполнялась разгрузка образца при двух девятиаторах напряжений 100 и 200 кПа. Испытание прекращалось при незатухающей вертикальной деформации на одной из ступеней загрузки.



Рис. 2. Деформации простого сдвига (скашивания):  
а – ячейка прибора; б – образец после испытаний

### Результаты исследований

Результаты испытаний ледниковых суглинков верхнего и нижнего горизонтов представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Модуль сдвига рассчитывался по методике К.Р. Массарша [1]. Относительная деформация сдвига определялась, как отношение перемещения штампа к начальной высоте образца ( $\epsilon = \gamma/h_0$ ). Модуль сдвига при разрушении ( $G_f$ ) определен по аппроксимирующей прямой, построенной из начала координат в точку, соответствующую касательному напряжению при разрушении образца. Секущий модуль ( $G_{50}$ ) вычислен по прямой, проходящей из начала координат в точку, соответствующую касательному напряжению, равному 50 % от напряжения при разрушении образца. Значения модулей сдвига при трех значениях нормальных напряжений 100, 200 и 300 кПа представлены в табл. 3.

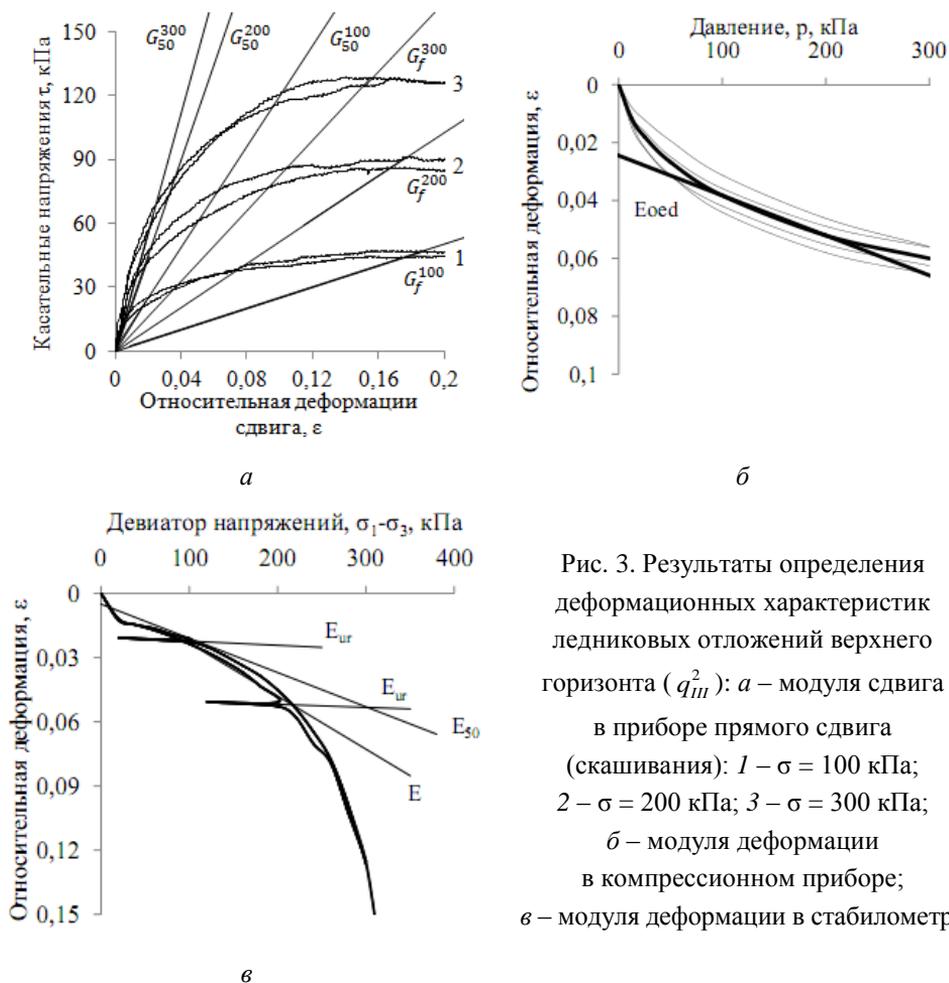


Рис. 3. Результаты определения деформационных характеристик ледниковых отложений верхнего горизонта ( $q_{III}^2$ ): а – модуля сдвига в приборе прямого сдвига (скашивания): 1 –  $\sigma = 100$  кПа; 2 –  $\sigma = 200$  кПа; 3 –  $\sigma = 300$  кПа; б – модуля деформации в компрессионном приборе; в – модуля деформации в стабилометре

Модуль сдвига рассчитывался по методике К.Р. Массарша [1]. Относительная деформация сдвига определялась, как отношение перемещения штампа к начальной высоте образца ( $\epsilon = \gamma/h_0$ ). Модуль сдвига при разрушении ( $G_f$ ) определен по аппроксимирующей прямой, построенной из начала координат в точку, соответствующую касательному напряжению при разрушении образца.

Секущий модуль ( $G_{50}$ ) вычислен по прямой, проходящей из начала координат в точку, соответствующую касательному напряжению, равному 50 % от напряжения при разрушении образца. Значения модулей сдвига при трех значениях нормальных напряжений 100, 200 и 300 кПа представлены в табл. 3.

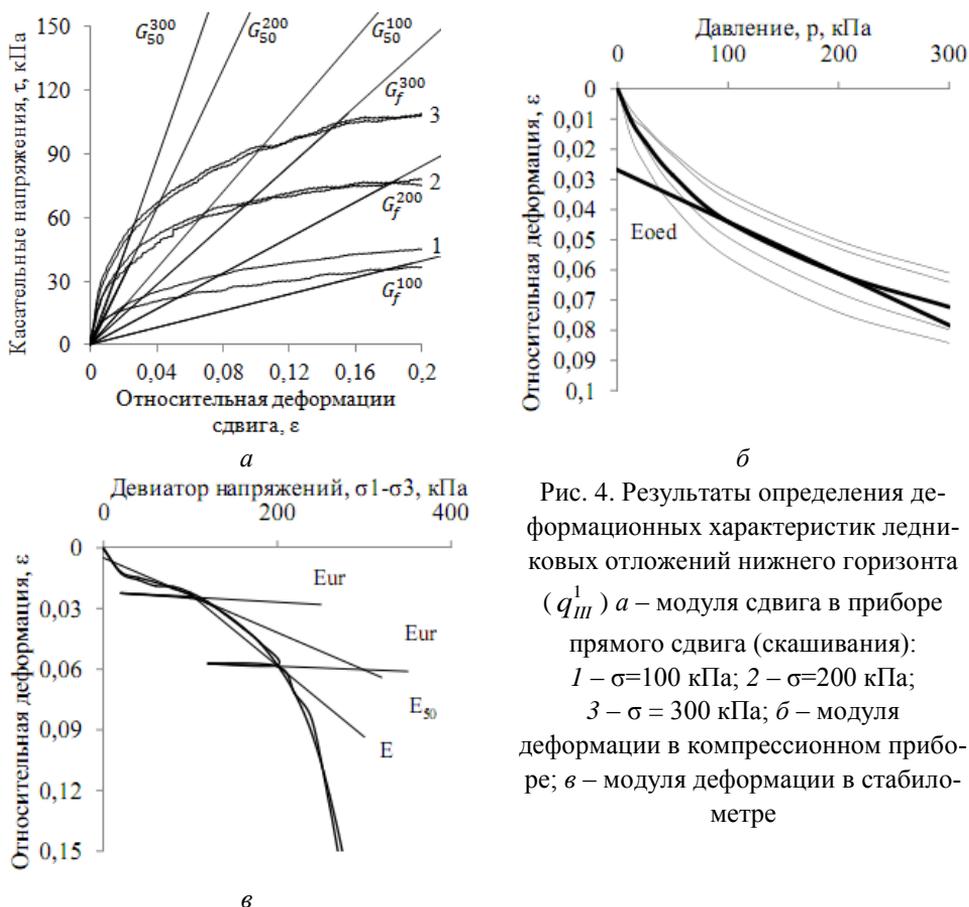


Рис. 4. Результаты определения деформационных характеристик ледниковых отложений нижнего горизонта ( $q_{III}^1$ ) а – модуля сдвига в приборе прямого сдвига (скашивания): 1 –  $\sigma=100$  кПа; 2 –  $\sigma=200$  кПа; 3 –  $\sigma=300$  кПа; б – модуля деформации в компрессионном приборе; в – модуля деформации в стабилометре

Таблица 3

Значения модуля сдвига при разрушении и секущего модуля

Нормальное напряжение, $\sigma$ , кПа	$G_{ref}$ , МПа, для горизонта ледниковых суглинков		$G_{50}$ , МПа, для горизонта ледниковых суглинков	
	Верхнего	Нижнего	Верхнего	Нижнего
100	0,29	0,22	1,24	0,87
200	0,51	0,33	2,15	1,62
300	0,83	0,52	2,77	2,16

Таблица 4

Значения компрессионного модуля деформации в интервале давлений 100–200 кПа

Вид испытаний	$E$ , МПа, для горизонта ледниковых суглинков	
	Верхнего	Нижнего
Одометрические	3,76	2,62
Трехосные	4,03	2,84

Таблица 5

Значения модуля деформации и рассчитанного модуля сдвига

Нормальное напряжение, $\sigma$ , кПа	$E$ , МПа, для горизонта ледниковых суглинков		Вычисленный $G$ , МПа, для горизонта ледниковых суглинков	
	Верхнего	Нижнего	Верхнего	Нижнего
100	1,59	1,18	0,59	0,43
200	2,34	1,91	0,86	0,70
300	3,04	2,42	1,12	0,89

Далее вычислялись одометрический и компрессионные модули деформаций в интервале давлений 100-200 кПа. Выбор интервала обусловлен необходимостью перехода к так называемому штамповому модулю путем применения повышающего коэффициента Агишева  $m_k = 5,0$  для исследуемых ледниковых суглинков. Одометрический модуль деформации в интервале давлений 100–200 кПа для верхнего и нижнего горизонтов составил 7,25 и 5,84 МПа соответственно. Значения компрессионных модулей деформации полученных по результатам трехосного и компрессионного сжатия для интервалов давлений 100–200 кПа представлены в табл. 4. С учетом коэффициента  $m_k$  штамповый модуль составит 19,5 и 13,7 МПа для верхнего и нижнего горизонтов соответственно.

Значения модуля сдвига для трех нормальных главных напряжений 100, 200 и 300 кПа, рассчитанные по формуле:  $G = E/2(1 + \nu)$ , где  $E$  – модуль деформации, МПа;  $\nu$  – коэффициент Пуассона представлены в табл. 5.

Модуль нагрузки-разгрузки и секущей модули рассчитаны по результатам трехосных испытаний согласно рекомендациями руководства к ПВК PLAXIS [2]. Модуль нагрузки-разгрузки составил 60,86 и 49,77 МПа для ледниковых суглинков верхнего и нижнего горизонтов соответственно, а секущий модуль – 7,59 и 6,02 МПа.

### Выводы

1. Небольшое отличие в значениях модуля деформации при определении в одометре и приборе трехосного сжатия можно объяснить различным видом напряженно-деформированного состояния, а также влиянием гравия и гальки содержащихся в образцах.

2. Для исследуемых суглинков модуль сдвига, рассчитанный по формуле:  $G = E / 2(1 + \nu)$ , в 2-2,5 раза меньше секущего модуля сдвига и в 1,3-2,1 раза больше модуля сдвига при разрушении. Это означает, что при расчете осадок свайных фундаментов согласно СП 24.13330.2011 используется модуль сдвига, при котором несущая способность грунтов исчерпана более чем на 50 %.

3. Для определения деформационных характеристик неидеальной упругопластической модели (Hardening soil) в руководство к PLAXIS рекомендует использовать соотношения  $E_{ur}/E_{oed}=3...5$  и  $E_{50}/E_{oed}=1...1,15$ . Для исследуемых грунтов данное соотношение  $E_{ur}/E_{oed}$  равно 8,4 и 8,5,  $E_{50}/E_{oed}$  равно 1,03 и 1,05 соответственно для ледниковых суглинков верхнего и нижнего горизонтов.

### **Библиографический список**

1. Массарш К.Р. Деформационные свойства мелкозернистых грунтов на основе показателей сейсмических испытаний // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2005.– № 9. – С. 203–220.

2. Swolfs W.M., E.Engin. Plaxis 3D: руководство пользователя. – Нидерланды: Plaxis bv, 2010. – 1022 с.

### **References**

1. Massarsh K.R. Deformatsionnye svoystva melkozernistykh gruntov na osnove pokazatelej sejsmicheskikh ispytaniy [Deformation properties of fine-grained soils on the basis of indicators of seismic tests]. Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo, 2005, no. 9, pp.203-220.

2. Swolfs W.M., Engin E.Plaxis 3D: Rukovodstvo pol'zovatelja [Manuals]. Niderlandy, Plaxis bv, 2010. 1022 s.

### **Об авторах**

**Саенко Юрий Викторович** (Архангельск, Россия) – аспирант, Северного (Арктический) федерального университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: yuri\_saenko@mail.ru

**Невзоров Александр Леонидович** (Архангельск, Россия) – доктор технических наук, профессор Северного (Арктический) федерального университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru

#### **About the authors**

**Saenko Yuri Viktorovich** (Arkhangelsk, Russian Federation) – Post-Graduate Student, Northern (Arctic) Federal University; e-mail: yuri\_saenko@mail.ru

**Невзоров Александр Леонидович** (Arkhangelsk, Russian Federation) – Doctor of Technics, Professor, Northern (Arctic) Federal University; e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru

Получено 27.03.2014