

УДК 624.131.53

DOI: 10.34753/HS.2023.5.4.353

**ОЦЕНКА ОБОСНОВАННОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА «КОСОГО  
СРЕЗА» К ДИАГРАММЕ  
ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ГРУНТА СДВИГУ ОТ НОРМАЛЬНОГО  
ДАВЛЕНИЯ**

А.Ю. Виноградов<sup>1,2</sup>, В.А. Обязов<sup>1,3</sup>,  
О.В. Зубова<sup>2</sup>, И.Ю. Лободенко<sup>4</sup>,  
С.В. Шендяпина<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; <sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Россия; <sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург, Россия; <sup>4</sup> ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Москва, Россия; <sup>5</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

[gd@npogtp.ru](mailto:gd@npogtp.ru)

**Аннотация.** При определении сопротивления грунтов сдвигу принято опираться на закон Кулона, имеющий вид линейного уравнения. Однако экспериментальные исследования, особенно в области малых нормальных нагрузок показывают отклонения значений модуля сдвига от линейной функции. Н.А. Цытовичем предложен метод «косого среза», учитывающий площадь среза, отличную от горизонтальной окружности. Таким образом, была предпринята попытка учета высоты деформируемого образца. Опыты, проводимые авторами статьи, во-первых, подтвердили нелинейность зависимости сопротивления сдвигу от нормальных нагрузок, а, во-вторых, выявляют противоречия в гипотезе «косого среза». Целью исследования является оценка применимости вышеуказанной гипотезы для обоснования возможности использования закона Кулона в практических расчетах. Для проведения оценки были проведены испытания

**ASSESSMENT OF THE VALIDITY OF  
THE APPLICATION OF THE "OBLIQUE  
CUT" METHOD TO THE DIAGRAM OF  
THE DEPENDENCE OF SOIL SHEAR  
RESISTANCE ON NORMAL PRESSURE**

Alexey Yu. Vinogradov<sup>1,2</sup>, Victor A. Obyazov<sup>1,3</sup>,  
Oksana V. Zubova<sup>2</sup>, Ivan Yu. Lobodenko<sup>4</sup>,  
Svetlana V. Shendyapina

<sup>1</sup>Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia; <sup>2</sup>Saint Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, Russia; <sup>3</sup>Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia; <sup>4</sup>Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia; <sup>5</sup>Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

[gd@npogtp.ru](mailto:gd@npogtp.ru)

**Abstract.** When determining the shear resistance of soils, conventional approach relies on Coulomb's equation, typically represented as a linear function. However, experiments, particularly in the field of small normal loads, demonstrate deviations in the shear modulus values from the linear function. Cytovich proposed the "oblique slice" method, which considers the slice area in non-horizontal circular form. An attempt was made to take into account the height of the deformable sample. The experiments conducted by the authors of the study confirmed the non-linear dependence of shear resistance on normal loads and revealed contradictions in the "oblique slice" hypothesis. The purpose of the study is to assess the validity of the hypothesis to substantiate the possibility of using Coulomb's equation in practical calculations. Tests were conducted on various soil types using the consolidated-drained method. For the same samples, calculations were performed using the

разных видов грунтов по консолидированно-дренированному способу с использованием компрессионного полевого прибора Литвинова. Для тех же образцов были проведены расчеты по методике «косого среза» Цытовича, а также расчеты по методике, учитывающей как увеличение, так и уменьшение высоты образца в процессе среза (отрицательный «косой срез»), которое может наблюдаться при больших нормальных нагрузках. В результате сравнительного анализа полученных результатов определены существенные различия значений  $tg\varphi$  и  $c$ , полученных при испытании по методике ГОСТ и рассчитанных по методу Цытовича. Увеличение высоты образца, на котором основана гипотеза «косого среза», происходит при малых нормальных нагрузках за счет разрыхления грунта при срезе. При этом поверхность среза не плоская, а сферическая, т.к. разрыхление неравномерно, наибольшим оно является в центральной части образца. При больших нормальных нагрузках происходит уменьшение высоты образца. Наилучшее «спрямление» зависимости между эмпирическими значениями тангенциальных и нормальных напряжений происходит при учете и увеличения высоты образца при малых, и уменьшении высоты при больших нормальных нагрузках. Применение метода «косого среза» не дает заявленного «спрямления» диаграммы сдвига, и его использование в практической деятельности не обосновано.

**Ключевые слова:** метод «косого среза»; уравнение Кулона; тангенциальные напряжения в грунтах; изменение высоты образца грунта при срезе.

### Введение

При проведении испытаний грунтов на консолидированный дренированный срез между значениями нормального и тангенциального усилий при малых нормальных нагрузках имеет место нелинейная зависимость. Данный факт был отмечен еще в 30-х годах 20 века [Цытович, 1940]. Однако, поскольку все расчеты прочностных свойств грунтов базируются на уравнении

Cytovich "oblique cut" method, as well as calculations using a method that takes into account both an increase and a decrease in the height of the sample during the cut. A comparative analysis of the results revealed significant difference in the values of  $tg\varphi$  and  $c$  obtained during testing according to the GOST method and calculated using the Cytovich method. An increase in sample height occurs at low normal loads due to loosening of the soil during cutting. In this case, the cut surface is not flat but spherical, as the loosening is uneven of the soil, with the greatest loosening occurring in the central part of the sample. At high normal loads, the height of the sample decreases. The best "straightening" of the dependence between the empirical values of tangential and normal stresses occurs when taking into account an increase in the height of the sample at low normal loads, and a decrease in height at high normal loads. The use of the "oblique slice" method does not "straighten" the shear diagram. Its use in practice is not justified.

**Keywords:** the "oblique cut" method; Coulomb's equation; tangential stresses in soils; change in the height of the soil sample during cutting.

Кулона, имеющем линейный вид, Н.А. Цытович предпринял попытку обосновать линейность данной зависимости и в области малых нормальных нагрузок. Он предложил считать, что площадь среза в этой области отличается от геометрической и учитывает несколько большую поверхность среза, называя таковую поверхность «косым срезом» [Цытович, 1963; 1983].

Проведя многочисленные эксперименты, авторы данной статьи также пришли к выводу о

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A., Zubova O.V., Lobodenko I.Yu., Shendypina S.V. Assessment of the validity of the application of the "oblique cut" method to the diagram of the dependence of soil shear resistance on normal pressure. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 4, pp. 353–364. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.4.353.

нелинейном виде исследуемой зависимости при нормальных нагрузках менее 0,1 МПа [Виноградов, Обязов, 2023].

Целью данной работы является оценка реализуемости гипотезы «косого среза» для обоснования возможности использования линейного уравнения Кулона в практических расчетах.

### Материалы и методы

Суглинки и супесь четвертичных отложений Ленинградской области, монолиты плотностью 1,88–1,94 т/м<sup>3</sup> и влажностью 0,25–0,33.

Испытания грунтов проводились по консолидированно-дренированному способу (ГОСТ 12248.1-2020), с использованием компрессионного полевого прибора лаборатории Литвинова с площадью внутреннего сечения компрессионной гильзы 25 см<sup>2</sup>.

### Традиционное обоснование линейности диаграммы среза

При исследовании зависимости между эмпирическими значениями тангенциальных и нормальных напряжений в грунтах при одноплоскостном срезе, понимая, что линейный закон Кулона не соответствует действительной диаграмме сдвига, исследователями был предложен метод «косого среза», обоснование которого производилось следующим образом [Цытович, 1963]. Он отмечает, что имеет место «значительный угол наклона обычной диаграммы сдвига к оси давлений при небольших нагрузках». Осознавая, что результаты опытов противоречат закону Кулона, им предложено для переноса точек из криволинейной части на «квазипрямую Кулона», учитывать некоторую гипотетическую, отличную от инструментальной, поверхность среза при малых нормальных нагрузках, называя ее «косым срезом». В этом случае срез происходит не по площади поперечного сечения срезывателя, а по иной поверхности, которая тем больше, чем меньшую нагрузку  $\sigma_z$  мы прикладываем. Цытович пишет: «Как показывают проведенные опыты, косой срез происходит в том случае, когда при испытаниях на срез

наблюдается увеличение высоты образца грунта в процессе среза» [Цытович, 1963, с.165]. Тангенс угла наклона плоскости «косого среза» определяется как отношение вертикального перемещения образца (увеличение высоты) к горизонтальному  $tga = \Delta h / \Delta b$ .

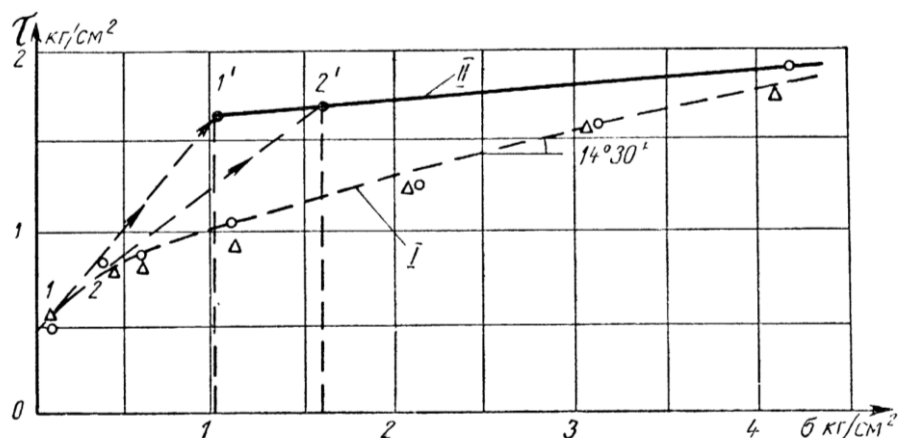
«При этом, площадь косого среза  $F_\alpha$  на прямоугольном срезывателе прибора Явейн-Цытовича определена  $F_\alpha = h / \sin\alpha$ , где  $h$  – полувысота срезывателя». В результате предложенных манипуляций диаграмма сдвига меняет свой вид и результаты «измерений» начинают укладываться в рамки «линейной» гипотезы (рисунок 1).

Поверхность среза при малой нормальной нагрузке проходит «не по площади поперечного сечения срезывателя, а по иной поверхности, которая близка к плоскости, но имеет другую площадь сечения» [стр. 165]. Вертикальное изменение высоты пробы в результате среза действительно имеет место, только имеет вид не плоскости, а, как мы уже писали, сегмента сферы с высотой  $\Delta h$ , особенно ярко выраженного при испытании на срез без нормальной нагрузки. При этом поверхность среза не повторяет поверхности сегмента.

Тангенс угла наклона плоскости «косого среза» [Цытович, 1963, с. 165] определяется как отношение вертикального перемещения образца (увеличение высоты) к горизонтальному  $tga = \Delta h / \Delta b$ . Площадь «косого среза»:  $S_\alpha = S / \cos\alpha$ . Вместо нормальной силы  $P$  вводится сила  $P_\alpha = T \sin\alpha + P \cos\alpha$  тангенциальной силы  $T$ :  $T_\alpha = T \cos\alpha - P \sin\alpha$ . Тогда искомые напряжения равны:  $\sigma_\alpha = P_\alpha / S_\alpha$  и  $\tau_\alpha = T_\alpha / S_\alpha$ .

### Результаты экспериментов

Проведем расчет, согласно схеме, предложенной Цытовичем для трех видов связных грунтов. Значения  $\sigma_1$  и  $\tau_1$  – получены в результате прямых измерений нормальной и тангенциальной сил, отнесенных к площади компрессионного кольца (среза);  $\sigma_\alpha$  и  $\tau_\alpha$  – рассчитаны по методу Цытовича (учет только увеличения высоты образца грунта в процессе среза);  $\sigma_2$  и  $\tau_2$  – с учетом как увеличения, так и сжатия образца в процессе среза.



**Рисунок 1.** Диаграмма сдвига для плотной глины, построенная с учетом поправки на «косой срез» [Цытович, 1963]

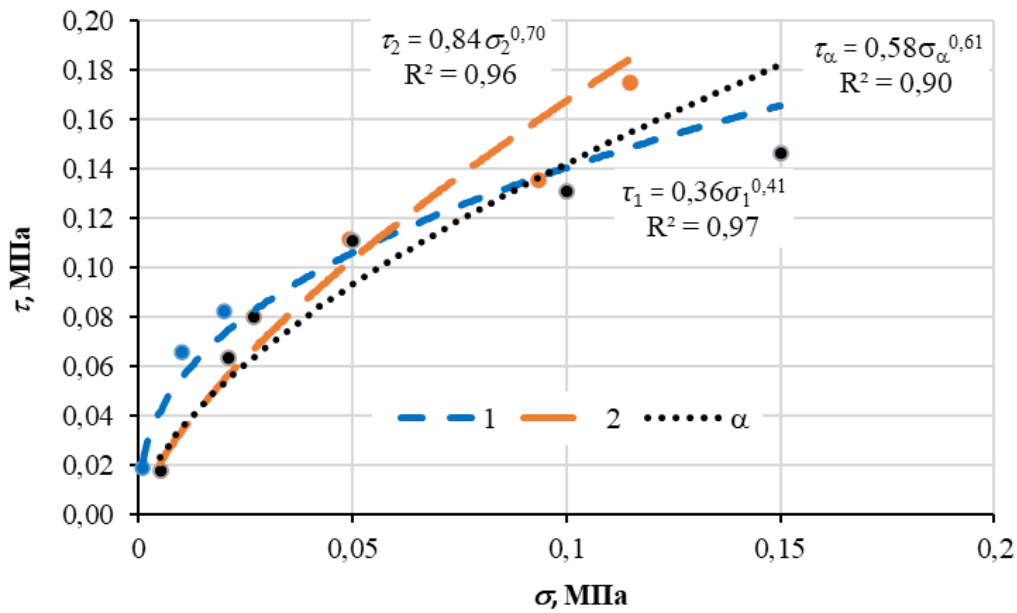
**Figure 1.** The diagram for dense clay, constructed taking into account the correction for the «oblique section» [Cytovich, 1963]

Образец 1 – суглинок тугопластичный, 3 (для всех значений нормального напряжения) и плотность  $1,89 \text{ т/м}^3$ , влажность 0,25. Результаты 4 (для значений нормального напряжения, при расчете параметров «косого среза» и диаграмм которых увеличение высоты образца сдвига представлены в таблице 1 и на рисунках 2, отсутствовало).

**Таблица 1.** Данные измерений и рассчитанные по методу Цытовича значения нормального и тангенциального усилий с учетом «косого среза». Образец 1

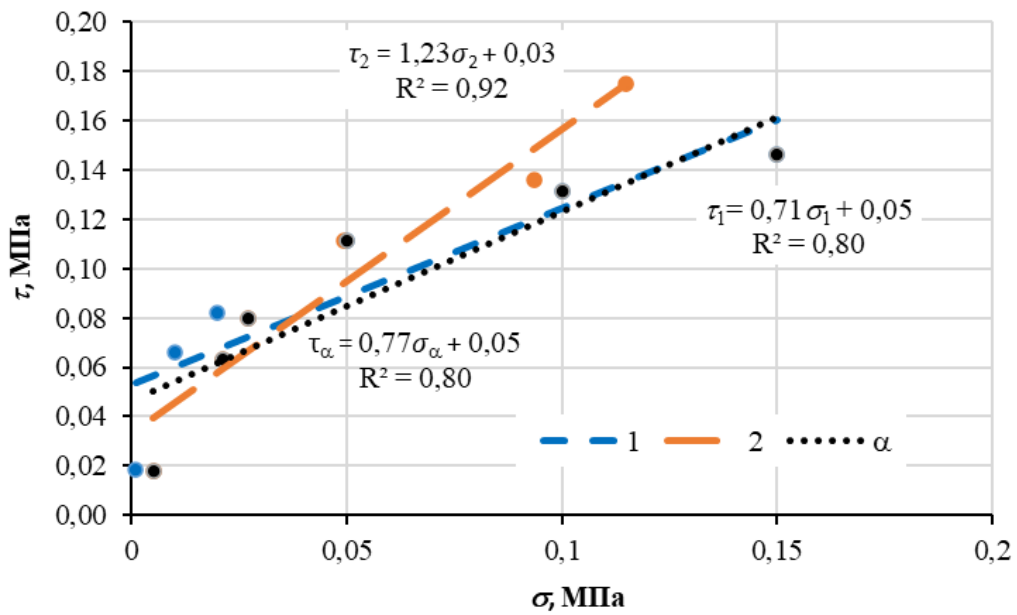
**Table 1.** Measurement data and the values of normal and tangential forces calculated using the Cytovich method, taking into account the "oblique cut". Sample 1

Показатель	Серия измерений и расчетов					
	1	2	3	4	5	6
$S, \text{ м}^2$	0,00256	0,00254	0,00251	0,00250	0,00250	0,00256
$P, \text{ кг}$	0,25	2,5	5	12,5	25	37,5
$T, \text{ кг}$	4,65	16,5	20,5	27,75	32,75	36,5
$tg\alpha$	0,226	0,174	0,088	-0,006	-0,048	-0,222
$\alpha$	0,222	0,172	0,088	-0,006	-0,048	-0,218
$P\alpha, \text{ кг}$	1,27	5,29	6,78	12,33	23,40	28,70
$T\alpha, \text{ кг}$	4,48	15,83	19,98	27,82	33,91	43,76
$\sigma_1, \text{ МПа}$	0,001	0,01	0,02	0,05	0,1	0,15
$\tau_1, \text{ МПа}$	0,019	0,066	0,082	0,111	0,131	0,146
$\sigma_\alpha, \text{ МПа}$	0,005	0,021	0,027	0,05	0,1	0,15
$\tau_\alpha, \text{ МПа}$	0,018	0,063	0,080	0,111	0,131	0,146
$\sigma_2, \text{ МПа}$	0,005	0,021	0,027	0,049	0,094	0,115
$\tau_2, \text{ МПа}$	0,018	0,063	0,080	0,111	0,136	0,175



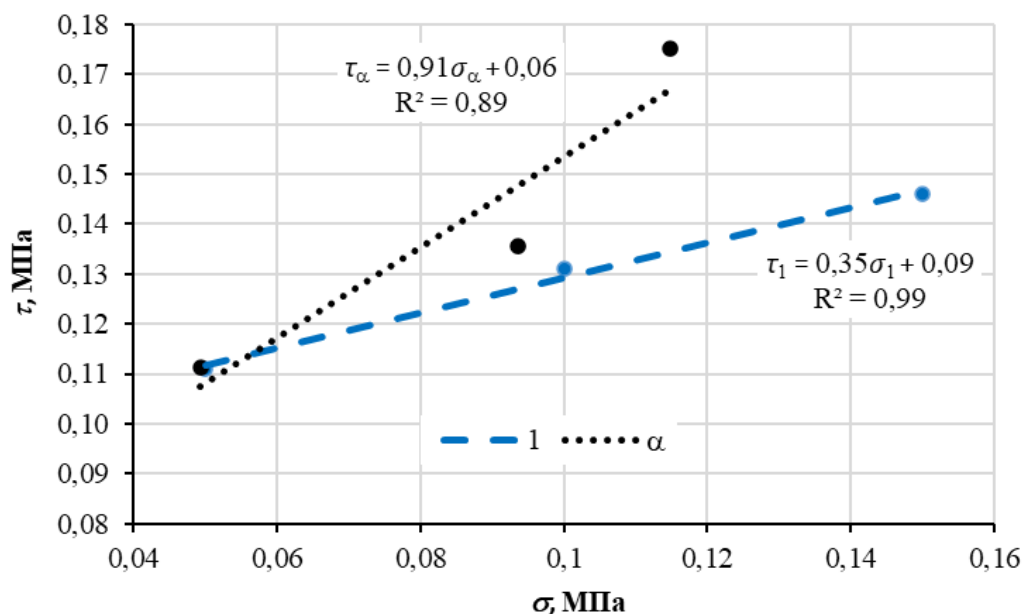
**Рисунок 2.** Диаграмма сдвига тугопластичного суглинка без поправки (1), с общей поправкой (2) и поправкой Цытовича ( $\alpha$ ) на «косой срез». Образец 1

**Figure 2.** The diagram of the shear of a refractory loam without correction (1), with a general correction (2) and a Cytovich correction ( $\alpha$ ) for an «oblique cut». Sample 1



**Рисунок 3.** Значения  $tg\varphi$  и  $c$  суглинка, для пар  $\sigma_1$  и  $\tau_1$  (1);  $\sigma_2$  и  $\tau_2$  (2),  $\sigma_\alpha$  и  $\tau_\alpha$  ( $\alpha$ )

**Figure 3.** The values  $tg\varphi$  and  $c$  loam, for pairs  $\sigma_1$  and  $\tau_1$ , (1);  $\sigma_2$  and  $\tau_2$ , (2),  $\sigma_\alpha$  and  $\tau_\alpha$ , ( $\alpha$ )



**Рисунок 4.** Значения  $tg\varphi$  и  $c$  суглинка, полученные с помощью стандартной диаграммы сдвига для значений нормального напряжения  $\sigma_i$  0,05; 0,1 и 0,15 МПа без поправки (1) и с поправкой Цытовича ( $\alpha$ ) на «косой срез». Образец 1

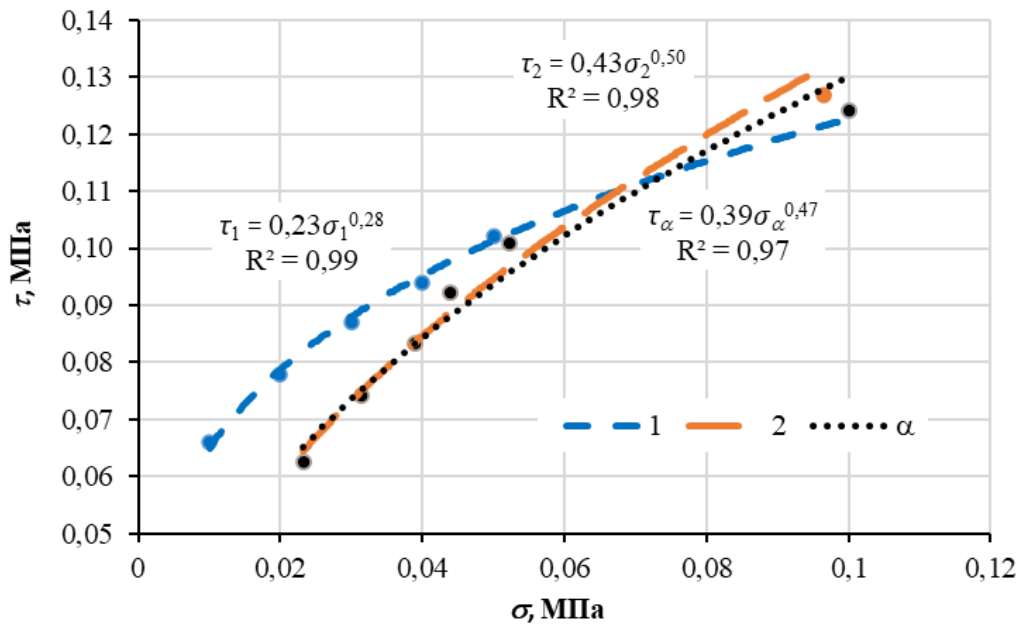
**Figure 4.** The values  $tg\varphi$  and  $c$  loam, obtained using a standard shear diagram for normal voltage values  $\sigma_i$  0,05; 0,1 and 0,15 МПа without correction (1), with the Cytovich correction ( $\alpha$ ) for an «oblique cut». Sample 1

Образец 2 – супесь пластичная, плотность параметров «косого» среза и диаграммы сдвига 1,92 т/м<sup>3</sup>, влажность 0,3. Результаты расчета представлены в таблице 2 и на рисунках 5, 6 и 7.

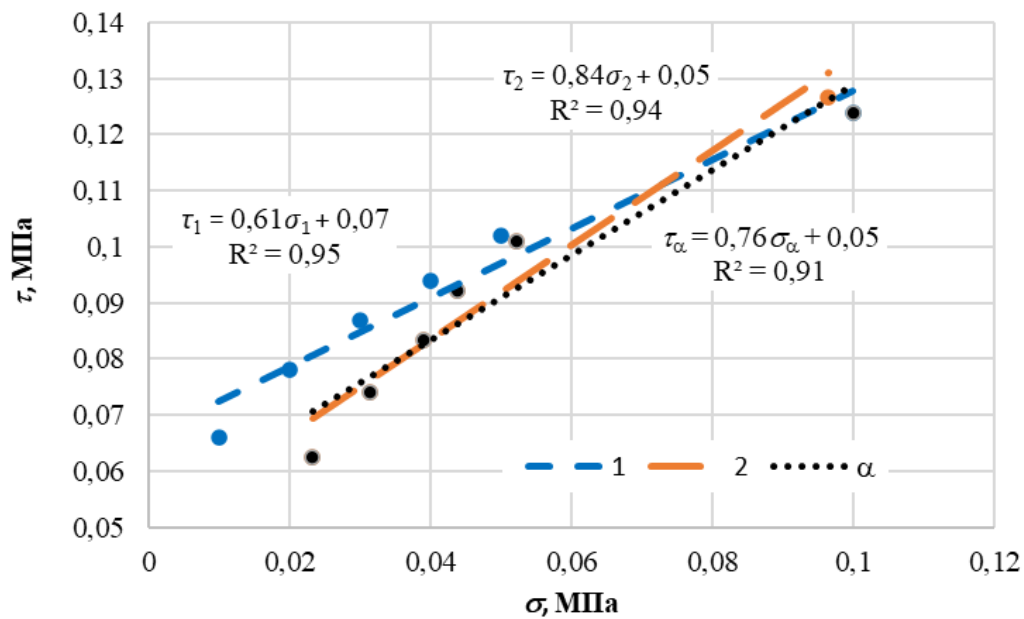
**Таблица 2.** Данные измерений и рассчитанные по методу Цытовича значения нормального и тангенциального усилий с учетом «косого среза». Образец 2

**Table 2.** Measurement data and the values of normal and tangential forces calculated using the Cytovich method, taking into account the "oblique cut". Sample 2

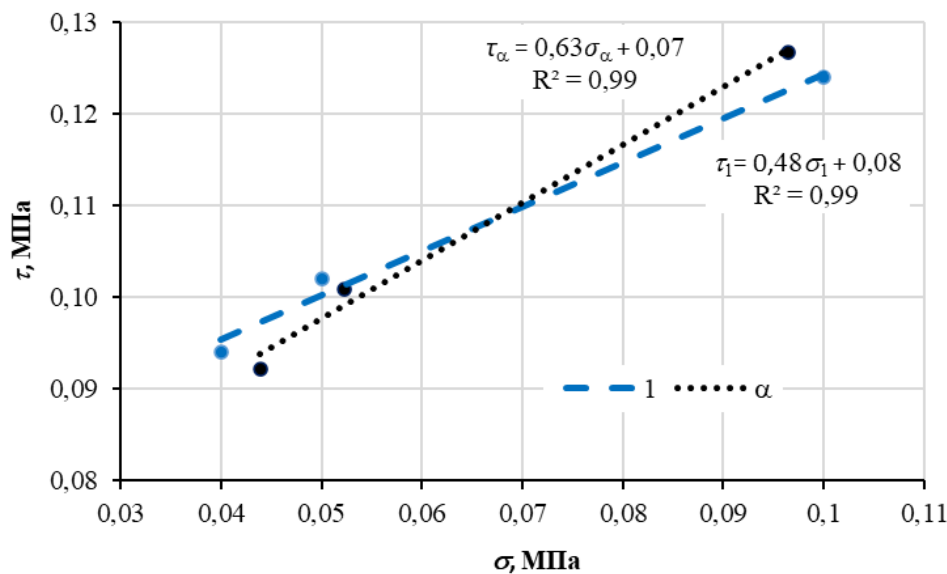
Показатель	Серия измерений и расчетов					
	1	2	3	4	5	6
$S, \text{ м}^2$	0,00255	0,00253	0,00251	0,00250	0,00250	0,00250
$P, \text{ кг}$	2,5	5	7,5	10	12,5	25
$T, \text{ кг}$	16,5	19,5	21,75	23,5	25,5	31
$tg\alpha$	0,209	0,151	0,106	0,042	0,022	-0,028
$\alpha$	0,206	0,150	0,106	0,042	0,022	-0,028
$P\alpha, \text{ кг}$	5,821	7,857	9,751	10,977	13,058	24,123
$T\alpha, \text{ кг}$	15,640	18,534	20,838	23,060	25,219	31,688
$\sigma_1, \text{ МПа}$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1
$\tau_1, \text{ МПа}$	0,066	0,078	0,087	0,094	0,102	0,124
$\sigma_\alpha, \text{ МПа}$	0,023	0,031	0,039	0,044	0,052	0,1
$\tau_\alpha, \text{ МПа}$	0,063	0,074	0,083	0,092	0,101	0,124
$\sigma_2, \text{ МПа}$	0,023	0,031	0,039	0,044	0,052	0,096
$\tau_2, \text{ МПа}$	0,063	0,074	0,083	0,092	0,101	0,127



**Рисунок 5.** Диаграмма сдвига тугопластичного суглинка без поправки (1), с общей поправкой (2) и поправкой Цытовича ( $\alpha$ ) на «косой срез». Образец 2  
**Figure 5.** The diagram of the shear of a refractory loam without correction (1), with a general correction (2) and a Cytovich correction ( $\alpha$ ) for an «oblique cut». Sample 2



**Рисунок 6.** Значения  $tg\varphi$  и  $c$  суглинка, для пар  $\sigma_1$  и  $\tau_1$ , (1);  $\sigma_2$  и  $\tau_2$ , (2);  $\sigma_\alpha$  и  $\tau_\alpha$ , ( $\alpha$ )  
**Figure 6.** The values  $tg\varphi$  and  $c$  loam, for pairs  $\sigma_1$  and  $\tau_1$ , (1);  $\sigma_2$  and  $\tau_2$ , (2);  $\sigma_\alpha$  and  $\tau_\alpha$ , ( $\alpha$ )



**Рисунок 7.** Значения  $tg\varphi$  и  $c$  суглинки, полученные с помощью стандартной диаграммы сдвига для значений нормального напряжения  $\sigma_i$  0,04; 0,05 и 0,1 МПа без поправки (1) и с поправкой Цытовича ( $\alpha$ ) на «косой срез». Образец 2

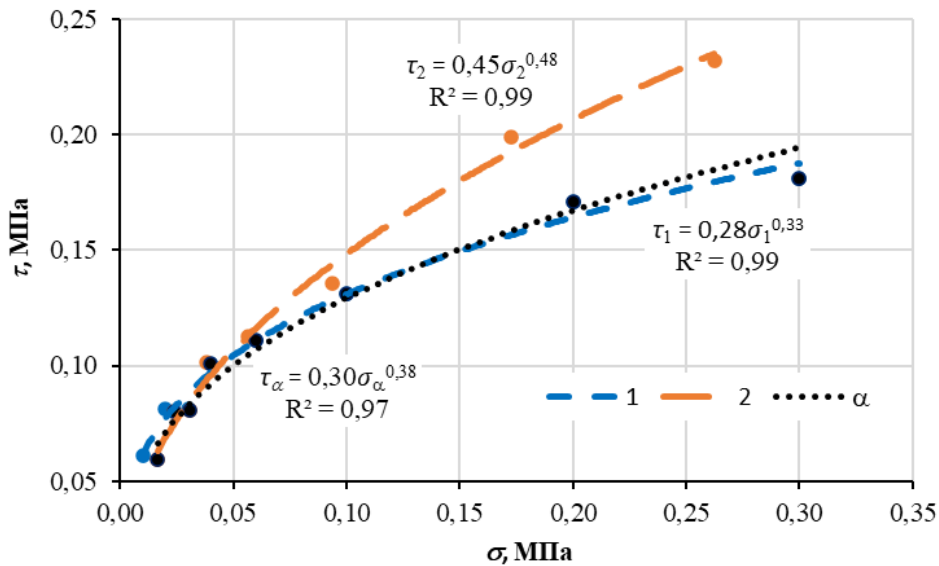
**Figure 7.** The values of  $tg\varphi$  and  $c$  of loam obtained using a standard shear diagram for the values of normal voltage  $\sigma_i$  0,04; 0,05 and 0,1 МПа without correction (1) and with the correction of Cytovich ( $\alpha$ ) for the «oblique section». Sample 2

Образец 3 – супесь пластичная, плотность параметров «косого среза» и диаграммы сдвига 1,91 т/м<sup>3</sup>, влажность 0,33. Результаты расчета представлены в таблице 3 и на рисунках 8, 9 и 10.

**Таблица 3.** Данные измерений и рассчитанные по методу Цытовича значения нормального и тангенциального усилий с учетом «косого среза». Образец 3

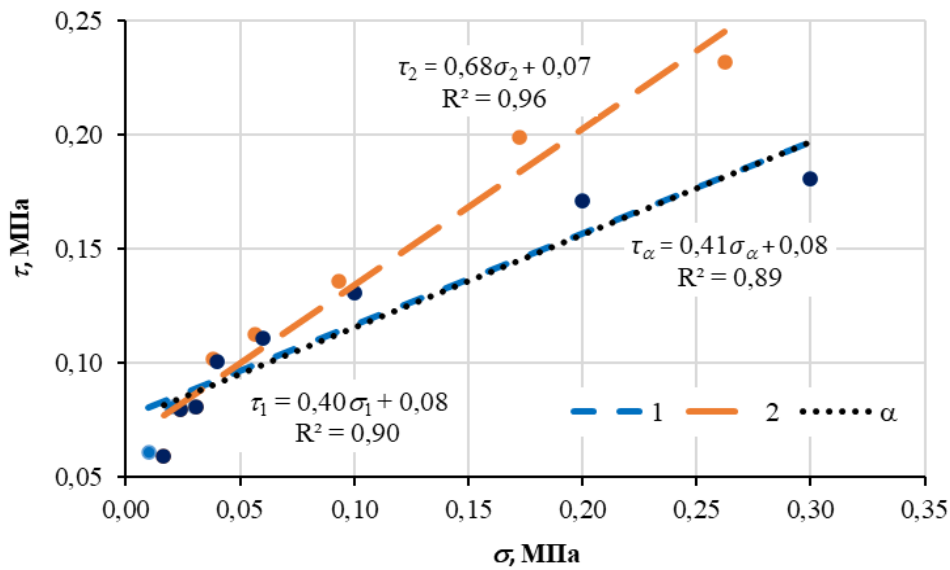
**Table 3.** Measurement data and the values of normal and tangential forces calculated using the Cytovich method, taking into account the «oblique cut». Sample 3

Показатель	Серия измерений и расчетов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
S, м2	0,00251	0,00250	0,00250	0,00250	0,00250	0,00250	0,00253	0,00254
P, кг	2,5	5	7,5	10	15	25	50	75
T, кг	15,25	20,25	20,25	25,25	27,75	32,75	42,75	45,25
$tg\alpha$	0,110	0,049	0,010	-0,017	-0,029	-0,049	-0,150	-0,183
$\alpha$	0,109	0,049	0,010	-0,017	-0,029	-0,049	-0,149	-0,181
$P\alpha$ , кг	4,15	5,99	7,70	9,56	14,18	23,37	43,11	65,61
$T\alpha$ , кг	14,89	19,98	20,17	25,42	28,18	33,93	49,69	58,03
$\sigma_1$ , МПа	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,10	0,20	0,30
$\tau_1$ , МПа	0,061	0,081	0,081	0,101	0,111	0,131	0,171	0,181
$\sigma_\alpha$ , МПа	0,017	0,024	0,031	0,04	0,06	0,10	0,20	0,30
$\tau_\alpha$ , МПа	0,060	0,080	0,081	0,101	0,111	0,131	0,171	0,181
$\sigma_2$ , МПа	0,017	0,024	0,031	0,038	0,057	0,093	0,172	0,262
$\tau_2$ , МПа	0,060	0,080	0,081	0,102	0,113	0,136	0,199	0,232



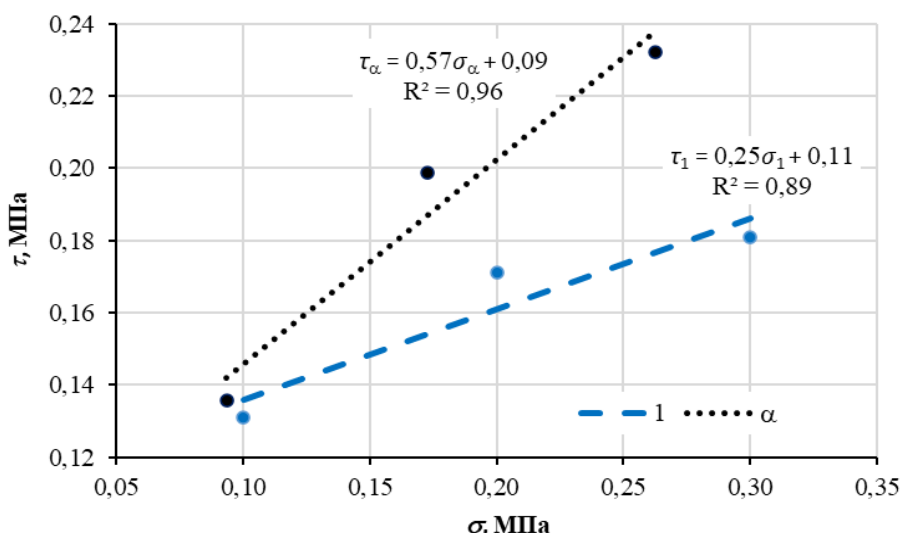
**Рисунок 8.** Диаграмма сдвига тугопластичного суглинка без поправки (1), с общей поправкой (2) и поправкой Цытовича ( $\alpha$ ) на «косой срез». Образец 3

**Figure 8.** The diagram of the shear of a refractory loam without correction (1), with a general correction (2) and a Cytovich correction ( $\alpha$ ) for an «oblique cut». Sample 3



**Рисунок 9.** Значения  $tg\phi$  и  $c$  суглинка, для пар  $\sigma_1$  и  $\tau_1$  (1);  $\sigma_2$  и  $\tau_2$  (2);  $\sigma_\alpha$  и  $\tau_\alpha$  ( $\alpha$ )

**Figure 9.** The values of  $tg\phi$  and  $c$  loam, for pairs  $\sigma_1$  and  $\tau_1$  (1);  $\sigma_2$  and  $\tau_2$  (2);  $\sigma_\alpha$  and  $\tau_\alpha$  ( $\alpha$ )



**Рисунок 10.** Значения  $tg\varphi$  и  $c$  суглинка, полученные с помощью стандартной диаграммы сдвига для значений нормального напряжения  $\sigma_i$  0,1; 0,2 и 0,3 МПа без поправки (1) и с поправкой Цытовича ( $\alpha$ ) на «косой срез». Образец 3

**Figure 10.** The values of  $tg\varphi$  and  $c$  of loam obtained using a standard shear diagram for the values of normal voltage  $\sigma_i$  0.1; 0.2 and 0.3 MPa without correction (1) and with the correction of Cytovich ( $\alpha$ ) for the «oblique section». Sample 3

**Анализ результатов**

1. Тангенс угла наклона плоскости «косого среза» определяется как отношение увеличения высоты к горизонтальному сдвигу. Ни у автора предложенного метода, ни в литературе нам не удалось найти объяснения, почему «косым срезом» считается только увеличение высоты образца при срезе, которое действительно имеет место при малых

нормальных нагрузках. Если оставаться в рамках изложенной Цытовичем логики, то в случае больших нормальных нагрузок при одноплоскостном срезе всегда наблюдается уменьшение высоты образца, т.е. отрицательный «косой срез» тоже имеет место.

2. Сравним значения  $tg\varphi$  и  $c$  полученные согласно требований ГОСТ12248.1-2020 и метода Цытовича. Результаты сведены в таблицу 4.

**Таблица 4.** Сравнительные результаты значений  $tg\varphi$  и  $c$ , полученные с помощью диаграммы среза и рассчитанные по методу Цытовича

**Table 4.** Comparative results of the values of  $tg\varphi$  and  $c$  obtained using a slice diagram and calculated using the Cytovich method

Показатель	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
	ГОСТ	«косой срез»	ГОСТ	«косой срез»	ГОСТ	«косой срез»
$tg\varphi$	0,35	0,91	0,63	0,48	0,25	0,57
$c$ , МПа	0,09	0,06	0,07	0,08	0,11	0,09

Если значения свободного члена – сцепления  $c$ , полученные по методике «косого среза» отличаются от ГОСТовской не более, чем на треть, то значения  $tg\varphi$  для образца 1 отличаются в несколько раз. Действительно, с помощью метода «косого среза» имеет место некоторое спрямление диаграммы среза. Однако, получаемые в результате предложенных

манипуляций ошибки точно не стоят бессмысленной погони за линейностью.

3. Во всех представленных случаях «спрямление» – цель Цытовича – наилучшим образом достигалась в случае полного учета «косого среза», т.е. и при уменьшении высоты образца при больших нормальных нагрузках (таблица 5).

**Таблица 5.** Сравнительные результаты «спрямления» эмпирической диаграммы среза**Table 5.** Comparative results of the «straightening» of the empirical slice diagram

Образец	1			2			3		
	$\sigma_1$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_2$
вариант									
показатель степени	0,407	0,613	0,693	0,276	0,474	0,503	0,327	0,371	0,477

4. Наконец, коэффициент детерминации «спрямление» опять же в случае полного учета при аппроксимации полученных результатов «косого среза» (таблица 6) прямой линией показывает, что наилучшее

**Таблица 6.** Сравнительные результаты коэффициентов детерминации аппроксимирующих зависимостей «спрямления» эмпирической диаграммы среза**Table 6.** Comparative results of the coefficients of determination of the approximating dependencies of the «straightening» of the empirical slice diagram

Образец	1			2			3		
	$\sigma_1$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_2$
вариант									
показатель степени	0,797	0,804	0,927	0,953	0,914	0,940	0,902	0,889	0,964

### Обсуждение

При проведении исследования грунта на одноплоскостной срез действительно при малых нормальных нагрузках имеет место увеличение высоты образца грунта. Связано это с тем, что при тангенциальном воздействии на образец, происходит его разрушение с последующим разрыхлением. Причем, максимальное разрыхление и, как следствие, увеличение высоты, происходит в центральной части образца. Последний после сдвигающего воздействия имеет вид цилиндра со сферической верхней поверхностью. Таким образом, мы можем говорить о воздействии тангенциальной силы на весь объем монолита – приводящую к его разрушению, но площадь среза при этом не меняется. Она не превышает по высоте срезанного сегмента 15 % от диаметра образца в среднем для большинства лабораторных приборов и методов полевых испытаний. Подобный эффект наблюдается как с монолитами, так и с предварительно «задавленными» большой нормальной нагрузкой, а потом разгруженными пробами (ГОСТ 12248.1–2020). С физической точки зрения изменения площади среза не происходит.

Изменение высоты образца при тангенциальном воздействии имеет место и при больших нормальных нагрузках. Только в этом случае, после приложения такой нагрузки образец сжимается. Причина сжатия та же, что и в

предыдущем случае. Образец под действием сдвигающего усилия разрыхляется и одновременно трамбуется нормальной силой. Этот эффект хорошо заметен при средних нормальных нагрузках – при приложении сдвигающей силы вначале образец увеличивается по высоте, а спустя несколько секунд под действием нормальной силы – сжимается. Если следовать логике Н.А. Цытовича, то и в этом случае наблюдается «косой срез»? Тем более, что при использовании предложенного им метода и для больших нормальных нагрузок, эмпирическая степенная зависимость выпрямляется больше, чем только для малых.

Поскольку опыт – критерий истины, мы в настоящей статье на экспериментальных данных рассмотрели все возможные варианты.

Итак, «косой срез» наблюдается не только при малых нормальных нагрузках, но и при больших, только с обратным знаком. В таблице 7 представлены вертикальные деформации монолитов при одноплоскостном медленном срезе. В столбцах а указана первичная просадка образца при приложенном нормальном усилии, в столбцах б – дальнейшая просадка (знак «-») или вспучивание (знак «+») при приложенном тангенциальном усилии.

Как видно из таблицы, вспучивание для рассматриваемых монолитов супеси, имеет место до нагрузок 10,0 кг (0,04 МПа). А уже при нагрузке 25,0 кг (0,1 МПа) при тангенциальном усилии отмечена просадка, то есть «косой срез»

Таблица 7. Вертикальные деформации монолитов при одноплоскостном срезе

Table 7. Vertical deformations of monoliths in a single-plane section

Плотность, кг/м <sup>3</sup> ; влажность, д/е	Нормальное усилие, кг													
	25,0		12,5		10,0		7,5		5,0		2,5		0,3	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
1920; 0,3	-0,63	-0,14	-0,43	+0,07	-0,24	+0,21	-0,14	+0,48	-0,09	+0,61	-0,03	+0,93	0	+1,83
1910; 0,33	-0,84	-0,22	-	-	-0,31	+0,05	-0,46	+0,08	-0,14	+0,35	-0,09	+0,52	-	-

имеет место всегда, только с положительным или отрицательным знаком в зависимости от нормальной нагрузки.

### Выводы

1. Геометрического изменения площади среза при испытаниях грунтов на одноплоскостной срез при малых нормальных нагрузках не происходит.

2. При малых нормальных нагрузках имеет место разрыхление грунта и увеличение высоты образца при приложении тангенциального усилия.

3. При больших нормальных нагрузках происходит дополнительная просадка при приложении тангенциального усилия.

4. Наилучшее «спрямление» зависимости между эмпирическими значениями тангенциальных и нормальных напряжений происходит при учете и увеличения высоты образца при малых, и уменьшении высоты при больших нормальных нагрузках.

5. Применение метода «косого среза» не дает заявленного результата «спрямления» диаграммы сдвига. Не выявлено соответствие эмпирических данных линейному уравнению Кулона. Площадь среза не является функцией от нормального давления, а определяется геометрически. Таким образом, использование метода «косого среза» в практической деятельности не обосновано.

### Литература

Виноградов А.Ю., Обызов В.А. Об аппроксимации зависимости сопротивления грунта сдвигу от нормального давления // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. Вып. 3. С. 283–291.

Цытович Н.А. Механика грунтов. Л-М.: Государственное издательство строительной литературы, 1940. 389 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов: [Учеб. пособие для гидротехн. и строит. специальностей вузов]. – 4-е изд., вновь перераб. и доп. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строит. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

### References

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A. Ob approksimacii zavisimosti soprotivleniya grunta sdivgu ot normal'nogo davleniya [About the approximation of the dependence of soil shear resistance on normal pressure]. *Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2023, vol. 5, no. 3, pp. 283–291. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov [Soil mechanics]*. Leningrad-Moskva, Publ. Gosudarstvennoe izdatel'stvo stroitel'noj literatury', 1940. 389 p. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov: [Ucheb. posobie dlya gidrotexn. i stroit. special'nostej vuzov]. – 4-e izd., vnov' pererab. i dop. [Soil mechanics: [Textbook for hydraulic engineering. and builds. university specialties]*. Moskva, Publ. Gosstrojizdat, 1963. 636 p. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov (kratkij kurs): Uchebnik dlya stroit. vuzov. – 4-e izd., pererab. i dop. [Soil Mechanics (short course): A textbook for builds. universities. – 4th edition revised and expanded]*. Moskva, Publ. Vysshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).