

## Динамический модуль упругости и модуль общей деформации модельных и природных глинистых грунтов

**Е.В. Пиоро**

МГУ имени М.В.Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, Москва, Ленинские горы д.1, (495)939-2400, piorok@yandex.ru

### Введение

В инженерной геологии хорошо известно, что модуль общей деформации дисперсных грунтов, получаемый по данным статических механических испытаний, зависит от величин прикладываемых нагрузок. Сейсмоакустическими методами определяют величины скоростей продольных и поперечных волн, по которым рассчитывают динамический модуль упругости. Понятно, что характер и величины действующих напряжений в таких испытаниях вызывают разные по природе и значениям деформации. Тем не менее, и те и другие деформации характеризуют поведение одного грунта с присущими ему составом, строением, состоянием и свойствами.

Основной целью исследований стало изучение деформационных характеристик модельных и природных глинистых грунтов прямыми (инженерно-геологическими) и косвенными (сейсмоакустическими) методами.

### Объекты исследования

В качестве объектов исследования были взяты модельные и природные грунты. Модельные глинистые грунты формовались из перемолотого моренного суглинка (gIdns), отобранного на территории г. Москвы, с добавлением среднеспесчаной фракции флювиогляциального песка в соотношении 0, 10, 25, 35 % по массе. Таким образом, были получены четыре различных по дисперсности модельных грунта, которые соответствовали суглинкам легким пылеватым и песчанистым (M1 и M2) и супеси песчанистой (M3, M4) (по ГОСТ 25100-2011). Грунты формовались при различной влажности и нагрузке уплотнения; характерные типы контактов – коагуляционные, точечные. Плотность модельных глинистых грунтов менялась от 1,54 до 2,30 г/см<sup>3</sup>, влажность от 4 до 15% (табл.1). Всего было изготовлено 109 образцов.

Исследования природных глинистых грунтов проводились на образцах суглинков донской морены ненарушенного сложения, имеющих незначительную усадку и смешанный характер структурных связей (типы контактов коагуляционные, точечные и цементационные). Плотность менялась от 2,02 до 2,21 г/см<sup>3</sup>, влажность от 11 до 14% (табл.1). В общей сложности было исследовано 25 образцов.

Отметим, что плотность и влажность природных грунтов меняются в значительно меньшем диапазоне, чем модельных.

**Таблица 1.** Плотности и влажности исследуемых глинистых грунтов

Образцы грунтов	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Влажность $\omega$ , %
Суглинки легкие пылеватые (M1)	<u>1,54-2,30</u> 2,05 (19)	<u>8-15</u> 10 (19)
Суглинки легкие песчанистые (M2)	<u>1,77-2,21</u> 2,05 (27)	<u>7-15</u> 10 (27)
Супеси песчанистые (M3)	<u>1,88-2,28</u>	<u>5-12</u>

	2,16 (32)	8 (32)
Супеси песчаные (M4)	<u>1,76-2,30</u> 2,16 (30)	<u>4-11</u> 8 (30)
Суглинки и супеси (gIdns)	<u>2,02-2,21</u> 2,14 (25)	<u>11-14</u> 12 (25)

По приведенным данным видно, что более высокие влажности характерны для образцов с высоким содержанием глинистых частиц (M1, M2) по сравнению с менее дисперсными разностями (M3, M4). Изменения плотности для исследуемых модельных грунтов в зависимости от содержания песка не закономерны и в большей степени отражают влияние диапазона уплотняющих нагрузок (от 2 до 14 кг).

### Методика исследований

Природные и искусственно сформованные образцы были исследованы методом одноосного сжатия, которое осуществлялось при постепенном нагружении образца грунта цилиндрической формы с отношением высоты и диаметра около 2:1. Горизонтальная и вертикальная деформации во время проведения испытаний измерялись тензометрическими датчиками. Возрастающая нагрузка прикладывалась со скоростью от 1 до 4 мм/мин до разрушения образца или до вертикальной деформации 15% (согласно ГОСТ 12248-96). По линейному участку графика напряжение-деформация  $\sigma(\epsilon)$  при  $\epsilon < 1\%$  был рассчитан модуль общей деформации (E).

На изготовленных образцах производилось измерение скоростей упругих волн (продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$ ) по методике прямого просвечивания на переменной базе: излучатель и приемник располагались на противоположных гранях образца на одной оси, при этом образец несколько раз укорачивался. Это позволяло построить годограф (зависимость времени прихода волны от пройденного расстояния), по наклону которого и рассчитать скорость. Такой метод существенно повышает точность расчета скорости  $V_s$ , так как по единичному измерению не всегда удается выделить вступление S-волны в интерференционной картине. Значения динамического модуля упругости рассчитывались по хорошо известной формуле:

$$E_d = V_s^2 \rho \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}.$$

### Результаты исследований

По результатам измерений и расчетов скорости продольных волн ( $V_p$ ) модельных глинистых грунтов менялись от 500 до 2000 м/с; скорости поперечных волн  $V_s$  от 200 до 550 м/с, а отношение  $V_s/V_p$  от 0,11 до 0,6. Скорости продольных  $V_p$  волн природных образцов менялись от 1350 до 1500 м/с, поперечных  $V_s$  – от 200 до 450 м/с, отношение  $V_s/V_p$  находилось в пределах 0,1÷0,3. Модули общей деформации по результатам одноосного сжатия (E) менялись от 5 до 125 МПа у модельных грунтов и от 2 до 20 МПа у природных (табл. 2).

**Таблица 2.** Результаты ультразвуковых исследований и одноосного сжатия

Образцы грунтов	$V_p$ , м/с	$V_s$ , м/с	$V_s/V_p$	Динамический модуль упругости $E_d$ , МПа	Модуль общей деформации E, МПа
-----------------	-------------	-------------	-----------	-------------------------------------------	--------------------------------

M1	500-2000	200-550	0,20-0,60	180-1650	15-125
M2	850-1950	240-340	0,11-0,39	520-1700	15-110
M3	900-1500	200-420	0,20-0,43	220-1050	20-65
M4	520-1650	160-500	0,22-0,52	160-1500	5-80
Суглинки и супеси (gIdns)	1350-1500	200-450	0,10-0,30	200-920	2-20

По полученным данным для более дисперсных модельных грунтов (M1, M2) характерны большие скорости продольных волн ( $V_p$ ) по сравнению с менее дисперсными (M3, M4) при схожих изменениях плотности. Подобное изменение скоростей соответствующим образом сказывается и на значениях динамического модуля упругости ( $E_d$ ) - в целом они снижаются с уменьшением дисперсности глинистых грунтов.

Отметим, что тенденция к снижению модулей при увеличении количества песчаных частиц в модельных грунтах наблюдается как в ультразвуковых исследованиях, так и при одноосном сжатии. В связи с этим была поставлена задача поиска прямой взаимосвязи динамического модуля упругости и модуля общей деформации для исследуемых грунтов.. Для этих целей в программе Statistica произведена обработка полученных данных и построена диаграмма рассеяния (рис.1).

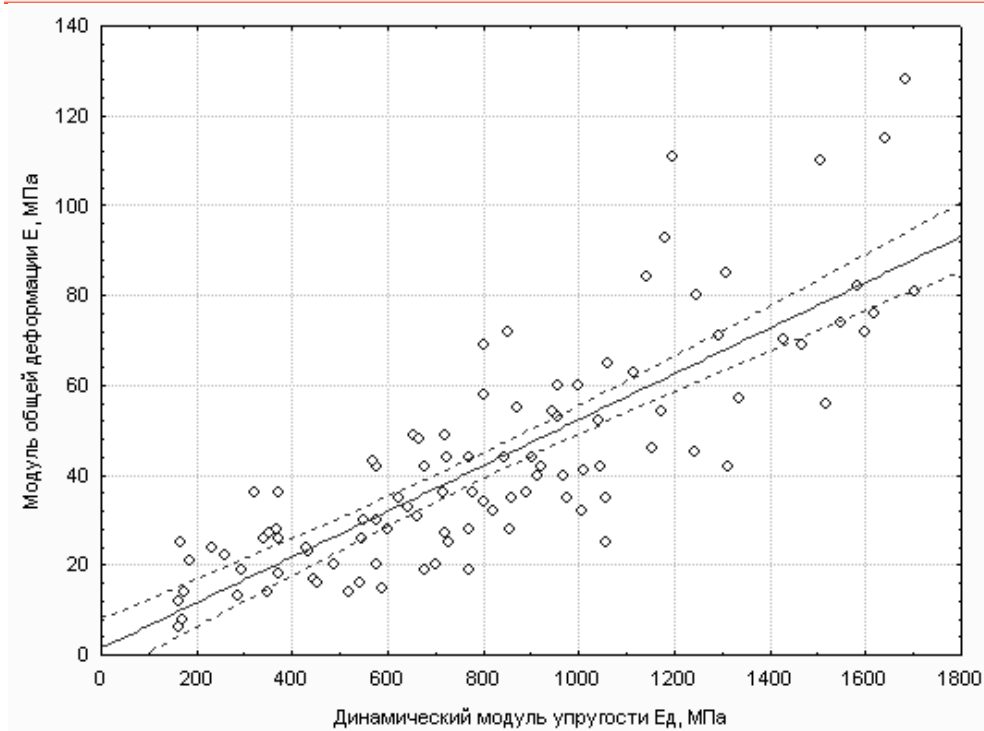
Отметим, что все распределения случайных величин подчиняются нормальному закону. Получено уравнения линейной взаимосвязи модуля общей деформации ( $E$ ) и динамического модуля упругости ( $E_d$ ) модельных грунтов:

$$E = 0,05E_d + 1,47. \quad (1)$$

Полученная зависимость является тесной ( $R=0,82$ ), однако, более точное уравнение взаимосвязи исследуемых показателей было получено по результатам регрессионного анализа:

$$E = 0,05E_d - 9,76I_L - 4,25\rho_d, \quad (2)$$

где  $I_L$  – показатель текучести (консистенции) грунта,  $\rho_d$  – плотность скелета. Последнее уравнение соответствует весьма тесной связи между изучаемыми модулями ( $r=0,95$ ) в модельных грунтах.



**Рис.1.** Взаимосвязь модуля общей деформации и динамического модуля упругости модельных глинистых грунтов (коэффициент детерминации  $r^2=0,67$ , оценка коэффициента корреляции  $r=0,82$ , уровень значимости  $p=0,000$ )

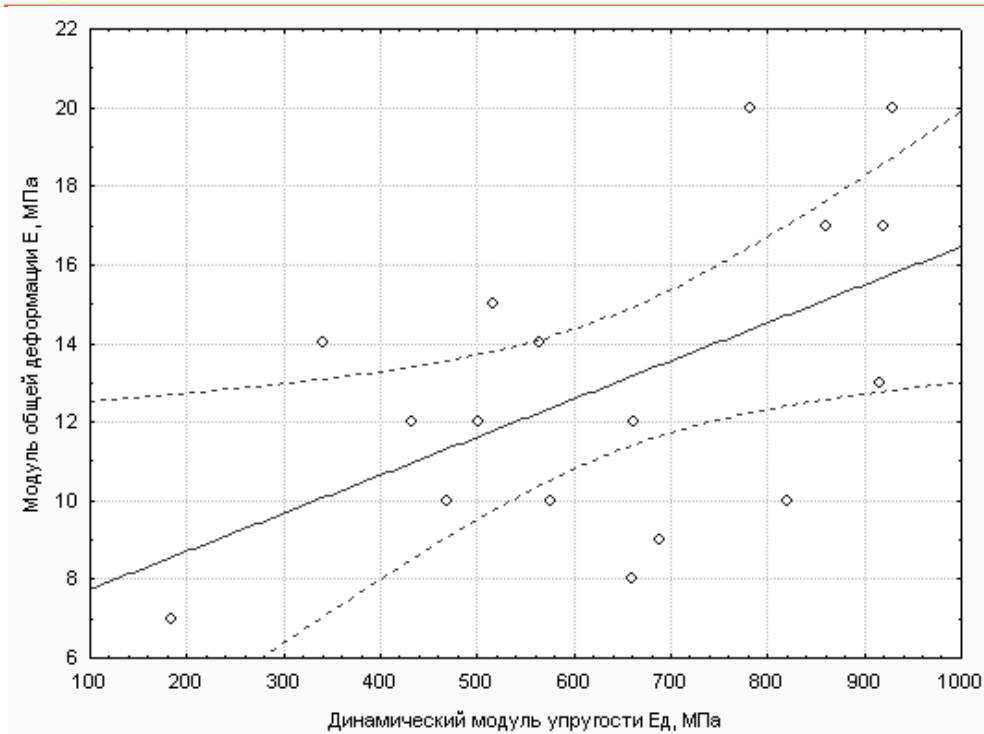
В случае природных моренных суглинков зависимость модуля общей деформации ( $E$ ) от динамического модуля упругости ( $E_d$ ) несколько иная (рис. 2) и описывается уравнением:

$$E = 0,01E_d + 6,77. \quad (3)$$

Однако полученное выражение описывает слабую связь между изучаемыми параметрами, что объясняется высокой степенью неоднородности строения изучаемых образцов. По данным регрессионного анализа соотношение описывается следующим образом:

$$E = -9,2 \frac{V_s}{V_p} - 22I_L + 1,32\omega, \quad (4)$$

где  $V_s$  - скорость поперечных волн,  $V_p$  - скорость продольных волн,  $I_L$  - показатель текучести грунтов,  $\omega$  - природная влажность. Эта зависимость весьма тесная ( $r=0,95$ ).



**Рис. 2.** Взаимосвязь модуля общей деформации и динамического модуля упругости природных моренных суглинков ( $r^2=0,29$ ,  $r=0,54$ ,  $p=0,025$ )

Уравнения взаимосвязи модулей деформации для природных и модельных грунтов отличаются, однако, при детальном рассмотрении понятно, что значения модуля общей деформации для одних и других грунтов – функция от скоростей упругих волн, значений плотности, влажности и консистенции грунтов. При попытке свести обе зависимости к прямой связи с этими простыми параметрами уравнения становятся более громоздкими, и приводить их не целесообразно.

Для поиска более точных и однозначных закономерностей необходимы более масштабные исследования на образцах природных грунтов и в массиве.

**Итоговая версия статьи опубликована:** *Материалы пятнадцатых Сергеевских чтений, молодежной конференции «Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты)». М., РУДН, 2013, с. 75-79.*