

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ ОЦЕНКИ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Предлагается методика и приводится пример построения корреляционных уравнений оценки физико-механических характеристик грунтов по результатам статического зондирования (удельное сопротивление грунта под конусом зонда и на боковой поверхности). Предложена методика выявления групп грунтов со сходным характером корреляционных связей, для которых возможно использовать отдельные корреляционные уравнения. Показана методика и построены корреляционное уравнение и номограмма для оценки модуля деформации широкого диапазона аллювиальных грунтов от песков до глин.

Согласно [1] для сооружений II уровня ответственности при наличии статистически обоснованных данных территориальных строительных норм, допускается по корреляционным уравнениям и таблицам определять модуль деформации E , угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c песков и глинистых грунтов только по результатам статического зондирования без их сопоставления с данными параллельных испытаний другими методами. Корреляционные уравнения и таблицы [2] для косвенной оценки прочностных и деформационных свойств грунтов должны разрабатываться путем параллельного сопоставления результатов статического зондирования и испытаний другими лабораторными (трехосное сжатие, одноплоскостной срез, компрессионное сжатие и др.), а также полевыми методами (штампы различной площади, прессиометр) тех же грунтов с соответствующей привязкой к их геологической истории формирования, возрасту и генетическому типу [3, 4].

Представленные в настоящей работе исследования проведены в целях разработки методики построения региональных корреляционных уравнений для оценки физико-механических характеристик грунтов по данным статического зондирования. В ходе разработки методики статистического анализа с учетом возможностей современных вычислительных средств использовались: ГОСТ 20522 [5], «Руководство по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов» ПНИИИС Госстроя СССР [6], книга Дмитриева В.В. «Оптимизация лабораторных инженерно-геологических исследований» [7], книги по теории математической статистики и решению практических задач Гмурмана В.Е. [8, 9], прикладной статистике в области исследования зависимостей и снижения размерности данных Айвазяна С.А. [10, 11], общей теории статистики Елисеевой И.И. [12], статистическим методам построения эмпирических формул Львовского Е.Н. [13], компьютерному анализу данных Наследова А.Д. [14] и некоторые другие.

Основные этапы методики разработки корреляционных уравнений приведены на рис. 1 в виде блок-схемы. На первом этапе работы происходит сбор информации из данных инженерно-геологических изысканий. Дальнейший статистический анализ данных испытаний в ходе второго этапа включает шесть пунктов:

1. Выбор входных данных для статистического анализа (физико-механические характеристики грунтов; параметры, измеряемые при погружении статического зонда в грунт) и их предварительная обработка (выделение ИГЭ, фильтрация данных и их отбор для экзаменационной выборки).

2. Корреляционный анализ, по результатам которого устанавливается теснота, направление и форма связи между переменными, оценка доверительных интервалов коэффициентов корреляции и статистической значимости отличия их от нуля, отсеивание предикторных переменных, не имеющих статистически значимой корреляции с критериальной переменной, а также сильно коррелированных между собой, диагностика мультиколлинеарности.

3. Модификация переменных, имеющих нелинейную связь с оцениваемой характеристикой грунтов, с целью линеаризации регрессионной модели.

4. Факторный анализ, в ходе которого выполняется классификация переменных статистического анализа и сокращение их числа, выявление латентных переменных и структуры связи между переменными.

5. Определение корреляционных уравнений для оценки механических характеристик различных типов грунтов, анализ значимости корреляционных уравнений в целом и их

коэффициентов, проверка нормальности остатков и отсутствия их автокорреляции.

6. Исследование устойчивости и области применимости получаемых корреляционных уравнений.



Рисунок 1 Процедура статистического анализа данных инженерно-геологических изысканий

Информация из данных инженерно-геологических изысканий была собрана по пяти площадкам: четырем на территории города Пензы и одной – соседнего города Заречный, включая 16 точек статического зондирования, испытания штампом 14 ИГЭ, результаты лабораторных определений физико-механических характеристик. Ввиду недостаточности данных величина штампового модуля деформации грунта E также определялась по результатам испытаний в условиях компрессионного сжатия после пересчета по локальному коэффициенту перехода m_k . В качестве переменных в статистическом анализе использовались физико-механические характеристики грунтов, а также параметры, измеряемые при погружении зонда в грунт, и их производные (табл. 1). Все рассматриваемые грунты относились к четвертичным аллювиальным отложениям.

Таблица 1 Параметры и характеристики, использованные в статистическом анализе

Параметры сопротивления грунта внедрению зонда и характеристики физико-механических свойств	Условное обозначен.	Единица измерения	Диапазон значений	
			мин.	макс.
<i>Параметры, измеряемые при погружении зонда в грунт</i>				
удельное сопро-т. грунта под конусом зонда	q_c	МПа	0,40	19,30
чистое удельное сопро-т. грунта под конусом зонда	q_n	МПа	0,12	19,16
удельное сопротивление грунта на участке боковой поверхности	f_s	кПа	1	170
фрикционное отношение	R_f	%	0,08	9,50
нормализованное сопротивление под конусом	Q_t	–	0,66	402
нормализованное фрикционное отношение	F_r	%	0,08	12,76
параметр типа грунта	I_{SBT}	–	1,12	4,09
параметр типа грунта (нормализованный по σ_{v0})	I_c	–	1,05	4,27
<i>Физические характеристики</i>				
природная влажность	w	%	11,0	26,2

плотность грунта в природном сложении	ρ	г/см ³	1,63	2,91
плотность сухого грунта	ρ_d	г/см ³	1,47	1,73
плотность частиц грунта	ρ_s	г/см ³	2,65	2,74
коэффициент пористости	e	–	0,53	0,85
влажность на границе текучести	w_L	%	14,8	42,1
влажность на границе раскатывания	w_p	%	12,8	21,0
число пластичности	I_p	–	9,5	25,1
показатель текучести	I_L	–	0,11	0,90
коэффициент водонасыщения	S_r	%	0,36	1,00
<i>Механические характеристики</i>				
штамповый модуль деформации	E	МПа	4,3	41,1

где $q_n = q_c - \sigma_{v0}$, $R_f = \frac{f_s}{q_c} 100\%$, $F_r = \frac{f_s}{q_n} 100\%$, $Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$, $I_r = \frac{G}{\tau}$, $\tau = c + \sigma_{v0} * \tan \varphi$,

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log(Q_t))^2 + (\log F_r + 1,22)^2}, I_{SBT} = \sqrt{(3,47 - \log(q_c/p_a))^2 + (\log R_f + 1,22)^2}.$$

Для проверки устойчивости и области применимости корреляционных зависимостей, вычисления расчетного значения модуля деформации строился односторонний доверительный $(1 - \alpha)\%$ предел по формуле [5]:

$$Y^*(X_1, \dots, X_p) = \hat{Y}(X_1, \dots, X_p) \pm t_\alpha \Delta, \quad (1)$$

где Δ – доверительный интервал корреляционного уравнения; \hat{Y} – рассчитанное по уравнению нормативное значение модуля деформации; X_1, \dots, X_p – усредненные по ИГЭ значения предикторных переменных; t_α – односторонний правый $(1 - \alpha)\%$ предел нормального распределения. Для сравнения точности оценки E вычислялись средние по выборкам значения Δ (табл. 2).

Значительные различия характера зависимости параметров статического зондирования от физико-механических характеристик грунтов различного вида, происхождения и возраста отмечены в трудах [15...24]. Таким образом, для групп, объединяющих грунты различного вида, происхождения и возраста, необходимо использовать различные корреляционные уравнения, отличающиеся номенклатурой входящих в них переменных, величиной коэффициентов, наличием нелинейных зависимостей, применимостью к грунтам с определенным диапазоном физических характеристик. Однако обоснованность выделения таких групп грунтов довольно субъективна и зависит от опыта исследователя.

Разработана статистически обоснованная методика выделения групп грунтов со сходным характером корреляционных связей, для которых возможно использовать отдельные корреляционные уравнения, и показана на примере оценки модуля деформации. Осуществляется выбор группирующих параметров – физических характеристик грунтов и/или параметров статического зондирования. В ходе работы автоматизированного алгоритма перебираются все возможные варианты объединения грунтов в группы. При использовании прямого шагового метода регрессии для каждой группы грунтов определяется номенклатура предикторных переменных и коэффициенты перед ними, вычисляется скорректированный по числу переменных коэффициент детерминации R_{adj}^2 . С помощью частного F -критерия Фишера определяются, имеет ли статистическую значимость прирост R_{adj}^2 при увеличении единицу числа групп грунтов. То есть, является ли значимым прирост точности корреляционного уравнения при дальнейшем сужении диапазона физико-механических свойств грунтов внутри выборки.

Для примера в качестве группирующих параметров рассматривались все доступные параметры статического зондирования и их производные. Было установлено, что среди них наилучшими являются нормализованное фрикционное отношение F_r и классификационный параметр типа грунта I_c , являющийся радиусом окружности с центром в верхнем левом углу диаграммы Robertson P.K. [25] (рис. 2). Диаграмма Robertson P.K. и подобные ей, по аналогии с традиционно применяемым в отечественной практике инженерно-геологических изысканий фрикционным отношением $R_f = f_s/q_c \cdot 100\%$, активно используется за рубежом для определения разновидности [26, 27] дисперсных грунтов по результатам статического зондирования. Границы зон (9 на рис. 2) на диаграммах получены путем сопоставления результатов статического зондирования с параллельными лабораторными исследованиями.

Выделенные по результатам группировки грунтов по характеру корреляционных связей зоны показаны на рис. 2 зонами I...V. Для грунтов внутри указанных зон приняты единые корреляционные уравнения. Внутренние границы между зонами I...V определены рассчитанными значениями оптимальных параметров группировки F_r и I_c , внешние – диапазонами свойств рассмотренных в работе грунтов.

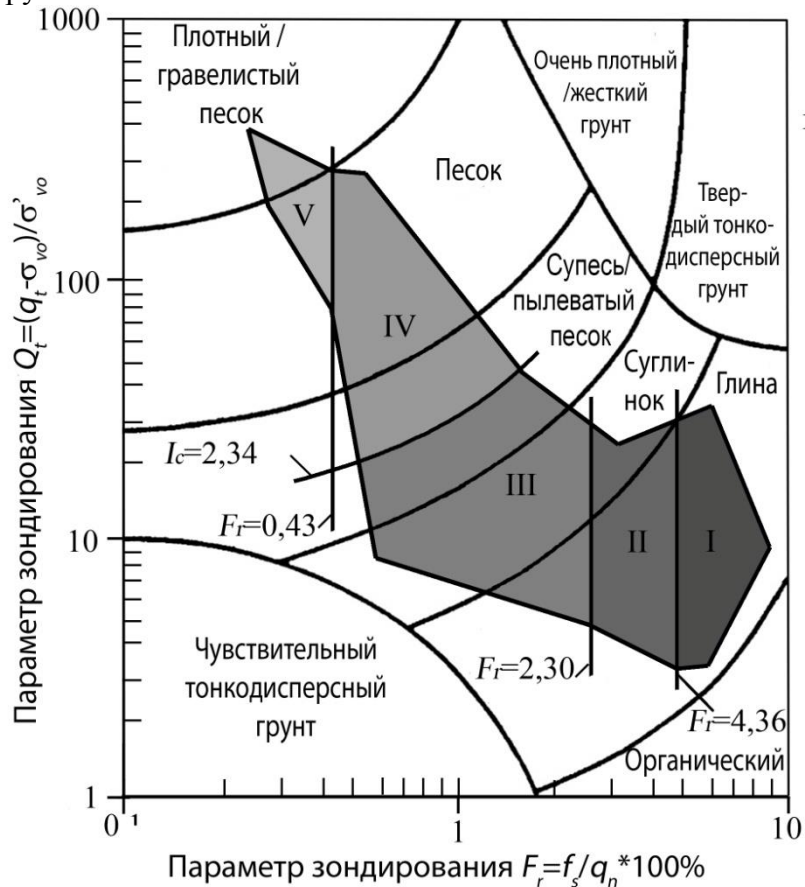


Рисунок 2 Классификационная диаграмма Robertson P.K. (1990) и группы I, II, ..., V грунтов со сходным характером корреляционных связей

Процедура практического использования предлагаемой методики выделения групп грунтов, включает следующие этапы.

1. По обучающему материалу определяются группы грунтов со сходным характером корреляционных связей (пример – рис. 2), для них разрабатываются отдельные корреляционные уравнения.

2. Выполняется статическое зондирование на новой площадке изысканий.

3. В зависимости от величины вычисленных значений группирующих параметров (в данном случае F_r и I_c) определяется принадлежность грунта к определенной группе с соответствующим корреляционным уравнением.

По результатам группировки грунтов было замечено, что коэффициенты уравнений определенным образом изменяются в зависимости от вида грунта. В общем виде корреляционное уравнение для оценки E может быть записано следующим образом:

$$E = a_1 + a_2 * q_c + a_3 * f_s \quad (2)$$

Постоянные в пределах одного вида грунта коэффициенты были заменены функциями (рис. 3), зависящими от вида грунта: $E = f_1(F_r, I_c) + f_2(F_r, I_c) * q_c + f_3(F_r, I_c) * f_s$. В результате было разработано единое корреляционное уравнение для оценки модуля деформации широкого диапазона грунтов от песков до глин:

$$E = 24,6 - 6,01 * I_c - 0,581 * I_c^2 + (1,08 - 1,51 * I_c + 1,09 * I_c^2) * q_c \quad (3)$$

Точность полученного корреляционного уравнения на 10 % для песков и на 60 % для глин выше, чем "классического" уравнения вида $E = \alpha * q_c$ (см. табл. 2). Сравнение точности оценки модуля деформации грунтов по различным корреляционным уравнениям приведено в табл. 2. Из таблицы следует, что группировка грунтов по характеру корреляционных связей между модулем деформации и параметрами статического зондирования позволяет повысить точность оценки модуля

деформации для глинистых грунтов в среднем на 27,0 % и 45,6 % для песков при их классификации согласно [28], на 53,5 % и 36,2 % при их классификации по [25].

С ростом содержания пылеватых и глинистых фракций в грунтах снижается точность оценки E по данным статического зондирования: для глинистых грунтов Δ в среднем на 79,1 % больше, чем для песков.

Включение в корреляционное уравнение параметра f_s в дополнение к q_c дает увеличение точности (уменьшение среднего доверительного интервала Δ) оценки E по данным статического зондирования на 6,6 % для глинистых грунтов и на 26,5 % для песков. Дополнительно для песков может быть включен в уравнение коэффициент пористости e , однако на практике определение природного e затруднено [15]. Рекомендуется использовать в качестве дополнительного аргумента для песков величину f_s . В корреляционное уравнение в дополнение к q_c может быть включена характеристика I_L , что дает увеличение точности оценки E на 11,5 % для глинистых грунтов. Включение в корреляционное уравнение в дополнение к q_c характеристики f_s также дает увеличение точности оценки модуля деформации глинистых грунтов, однако использование f_s как аргумента уравнения не оправдано с учетом меньшей стабильности его измерения [19] и относительно малого влияния на точность оценки E для глинистых грунтов. Рекомендуется использовать в качестве дополнительного к q_c аргумента показатель текучести I_L для глинистых грунтов.

Таблица 4 Точность оценки модуля деформации E в зависимости от метода разработки корреляционных уравнений и номенклатуры предикторных переменных

Метод классификации / разработки	Вид грунта		q_c	f_s	Доп. хар-ки	Δ , МПа	R_{adj}^2	Точность оценки E
Классификация ГОСТ 25100	Глинистый грунт		✓		-	4,53	0,714	↓ рост точности оценки E
			✓	✓	-	4,23	0,734	
			✓		I_L	4,01	0,749	
	Песок		✓	-	-	2,53	0,817	↓ рост точности оценки E
			✓	✓	-	1,86	0,840	
			✓	✓	Q_t	1,76	0,849	
			✓	✓	e	1,69	0,854	
Классификация Робертсон П.К. (1990) (рис. 2)	глина	↑ содержание глинистой и пылеватой фракций	✓	✓	-	4,84	0,704	↓ рост точности оценки E
	суглинок		✓	✓	-	5,37	0,656	
	супесь		✓	✓	-	1,84	0,843	
	песок		✓	✓	-	1,62	0,851	
Группировка по характеру корреляционных связей (рис. 2)	зона I	↑ содержание глинистой и пылеватой фракций	✓	✓	-	4,43	0,719	↓ рост точности оценки E
	зона II		✓	✓	-	3,12	0,795	
	зона III		✓	✓	-	2,45	0,821	
	зона IV		✓	✓	-	1,40	0,864	
	зона V		✓	✓	-	1,13	0,883	
Нелинейн. ур-е (3)	Песок и глинистый грунт		✓		I_c	1,67	0,872	

На основе нелинейного уравнения (3) создана номограмма для оценки модуля деформации аллювиальных четвертичных грунтов графическим методом (рис.3). Номограмма охватывает грунты с теми диапазонами характеристик, которые были рассмотрены в статистическом анализе.

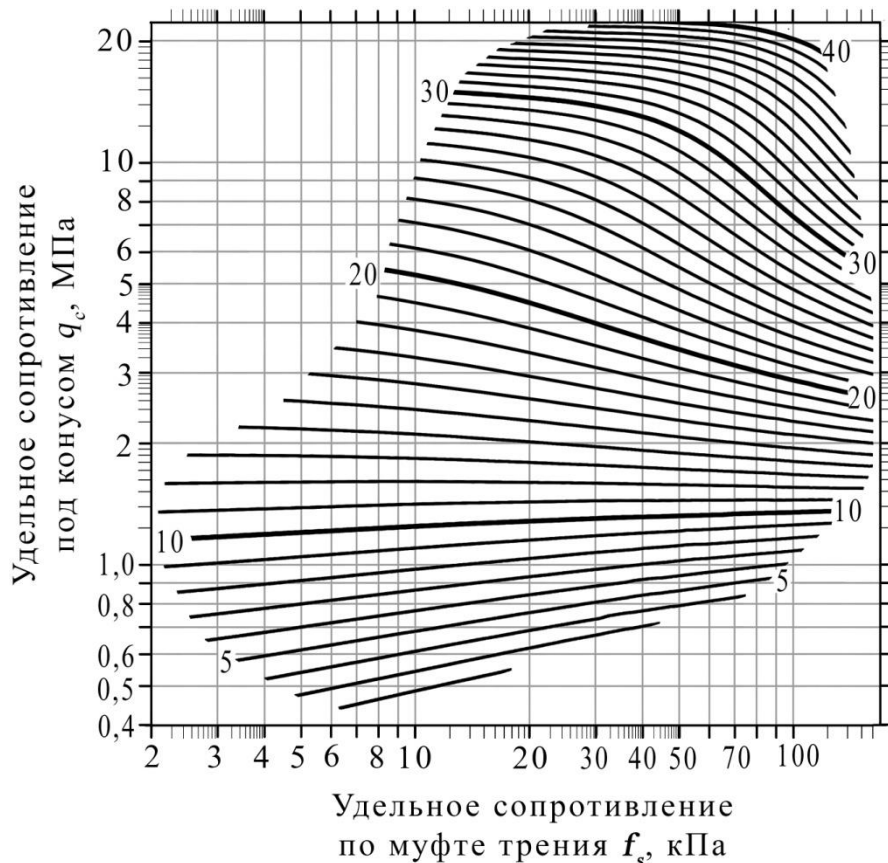


Рисунок 3 Номограмма для оценки модуля деформации E , МПа

Основные выводы.

1. Для увеличения точности оценки E глинистых грунтов по данным статического зондирования в качестве дополнительного к q_c аргумента корреляционных уравнений может использоваться показатель консистенции I_L , для песков – удельное сопротивление по муфте трения f_s .

2. С ростом содержания пылеватых и глинистых фракций в грунтах снижается точность оценки модуля деформации по данным зондирования.

3. Статистически обоснованное выделение групп грунтов по характеру корреляционных связей, определение группирующих параметров и диапазонов их значений позволяет повысить точность оценки модуля деформации.

4. Постоянные коэффициенты корреляционных уравнений могут быть заменены функциями переменных, зависящих от вида грунта. Это позволяет значительно повысить точность оценки модуля деформации глинистых грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений.
2. СП 47.13330-2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.
3. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Новичков Г.А. Интерпретация результатов полевых и лабораторных испытаний с целью определения прочностных и деформационных характеристик грунтов. Ч. I. // Инженерные изыскания. - 2014. - № 5-6. - С. 68-77.
4. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Новичков Г.А. Интерпретация результатов полевых и лабораторных испытаний с целью определения прочностных и деформационных характеристик грунтов. Ч. III. // Инженерные изыскания. - 2014. - № 5-6. - С. 86-97.
5. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
6. Руководство по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов / ПНИИИС Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1981. - 55 с.
7. Дмитриев В.В. Оптимизация лабораторных инженерно-геологических исследований. – М.: Изд. «Недра», 1989. – 185 с.
8. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – 9-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2004. – 404 с.

9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
10. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. - М.: Финансы и статистика, 1989. - С. 607.
11. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. - М.: Финансы и статистика, 1985. - 487 с.
12. Елисеева И.И. Эконометрика. - М.: Финансы и статистика, 2004. - 344 с.
13. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Изд. перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1988. - 239 с.
14. Наследов А.Д. SPSS 19. Профессиональный статистический анализ данных - СПб.: Питер, 2011. - 400 с.
15. Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов (в вопросах и ответах). - Саратов: Изд. центр "РАТА", 2013. - 356 с.
16. Зиангиров Р.С., Каширский В.И. Оценка деформационных свойств дисперсных грунтов по данным статического зондирования // "ОФМГ". - 2005. - № 1. - С. 12-16.
17. Игнатова О.И. Деформационные характеристики юрских глинистых грунтов Москвы // "ОФМГ". - 2009. - № 5. - С. 24-28.
18. Игнатова О.И. Исследование корреляционных связей модуля деформации четвертичных глинистых грунтов разного генезиса с удельным сопротивлением при статическом зондировании // "ОФМГ". - 2014. - № 2. - С. 15-19.
19. Рыжков, И.Б. Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. - М.: Изд-во АСВ, 2010. - 496 с.
20. ТСН 50-302-2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге.
21. ТСН 50-304-2001. Основания, фундаменты и подземные сооружения.
22. Sanglerat G. The penetrometer and soil exploration / G. Sanglerat. - Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1972. - 488 p.
23. Lunne, T., Christoffersen H.P. Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands // 15-th Annual OTC in Houston. - TX, 1983. - Pp. 181-192.
24. Senneset K., Sandven R., Janbu N. The Evaluation of soil parameters from piezocone tests // Transportation Research Record. - 1989. - Vol. 1. - Pp. 24-37.
25. Robertson P.K. Soil classification using the cone penetration test // Canadian Geotechnical Journal. - 1990. - № 27 (1). - Pp. 151-158.
26. ASTM D2487-2006. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system).
27. ISO 14688-2:2004. Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 2: Principles for a classification. - 2013. - 13 p.
28. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация.