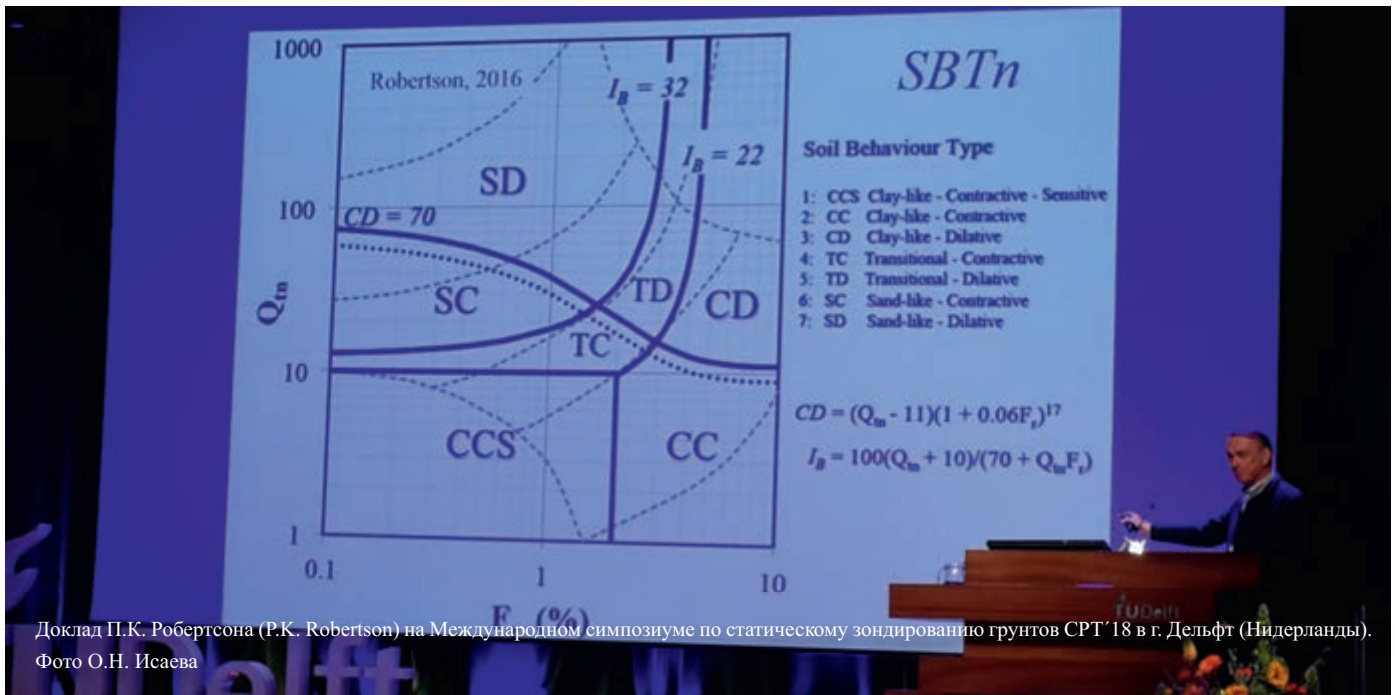


О КЛАССИФИКАЦИИ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



Доклад П.К. Робертсона (P.K. Robertson) на Международном симпозиуме по статическому зондированию грунтов СРТ'18 в г. Дельфт (Нидерланды). Фото О.Н. Исаева

БОЛДЫРЕВ Г.Г.*

ООО «НПП «Геотек»», г. Пенза, Россия, g-boldyrev@geotek.ru
Адрес: ул. Центральная, д. 1Н, г. Пенза, 440068, Россия

ИДРИСОВ И.Х.

ООО «НПП «Геотек»», г. Пенза, Россия, idrisov@npp-geotek.ru

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 19.11.2019 / Принята к публикации 26.12.2019 / Дата публикации 29.12.2019

© ООО «Геомаркетинг», 2019

Аннотация

В работе представлен анализ известных методов классификации грунтов с использованием параметров статического зондирования СРТ, СРТУ: лобовое сопротивление, силы трения и поровое давление, измеряемое в основании конуса. Одним из наиболее распространенных, основанных на СРТ, методов оценки типа грунта является диаграмма, предложенная в 1986 г. П.К. Робертсоном (P.K. Robertson) с коллегами, основанная на лобовом сопротивлении конусного зонда q_c и коэффициенте трения R_f . Несмотря на то, что за прошедшие годы предложены новые диаграммы на основе нормализованных параметров и другие, первая диаграмма Робертсона, основанная на q_c и R_f , широко применяется на практике, потому что она проста и может использоваться в режиме реального времени при статическом зондировании. Исследования, выполненные различными авторами, указывают на то, что известные классификационные диаграммы не могут обеспечить точный прогноз типа грунта на основе свойств грунтов, а скорее могут служить ориентиром в типе механического поведения грунта: сыпучий или связный. Корреляции между составом грунта и механическими свойствами не просты, особенно в переходных зонах от одного типа к другому, что приводит к вероятности неправильной классификации грунта с использованием известных диаграмм СРТ-классификации. Для учета подобной вероятности в ошибке классификации грунта используются методы статистической оценки, методы нечеткой классификации и нейронные сети, которые учитывают неопределенность в корреляции между составом грунта и механическим поведением и в какой-то степени устраняют недостатки. На примере практической классификации грунтов по данным статического зондирования СРТ показана возможность совмещения метода Робертсона и классификационной системы грунтов РФ.

Ключевые слова:

классификация грунтов; статическое зондирование; тип поведения грунта; диаграммы классификации; вероятностные методы; сравнение различных методов

Ссылка для цитирования:

Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., 2019. О классификации грунтов по данным статического зондирования. Инженерная геология, Том XIV, № 4, с. 6–23, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2019-14-4-6-23>.

ABOUT CLASSIFICATION OF SOILS BY CONE PENETRATION TEST

GENNADII G. BOLDYREV*

"Scientific Production Enterprise "Geotek" LLC, Penza, Russia,
g-boldyrev@geotek.ru
Address: Bld. 1H, Centralnaya St., 440068, Penza, Russia

ILIYA KH. IDRISOV

"Scientific Production Enterprise "Geotek" LLC, Penza, Russia,
idrisov@npp-geotek.ru

Original paper

Received 19 November 2019 / Accepted 26 December 2019 / Published 29 December 2019

© "Geomarketing" LLC, 2019

Abstract

The paper presents an analysis of well-known soil classification methods using the parameters of static penetration test CPT, CPTU: tip resistance, sleeve friction and pore pressure measured at the shoulder. One of the most common CPT-based soil type estimation methods is the chart proposed by P.K. Robertson et al. in 1986, based on the tip resistance q_c and the friction coefficient R_f . Despite the fact that over the years, new diagrams based on normalized parameters and others have been proposed, the first Robertson diagram based on q_c and R_f is widely used in practice because it is simple and can be used in real time during static penetration test. Studies performed by various authors show that the well-known classification charts cannot provide an accurate prediction of the type of soil based on the properties of soils, but rather can serve as a guideline in the type of mechanical behavior of the soil: noncohesive or cohesive. The correlation between soil composition and mechanical properties is not simple, especially in transition zones from one type to another, which leads to the probability of incorrect soil classification using well-known CPT-classification charts. To take this probability into account in the soil classification error, statistical estimation methods, fuzzy classification methods and neural methods are used, which take into account the uncertainty in the correlation between soil composition and mechanical behavior and to some extent eliminate the disadvantages. Using the practical classification of soils according to static penetration test CPT as an example, the possibility of combining the Robertson method and the classification system of soils of the Russian Federation is shown.

Key words:

soil classification; cone penetration test; soil behavior type; classification charts; probabilistic method; comparison of various methods

For citation:

Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh., 2019. About classification of soils by cone penetration test. Engineering Geology World, Vol. XIV, No. 4, pp. 6–23, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2019-14-4-6-23>.

Введение

В зарубежной практике инженерно-геологических изысканий широко используются методы статического зондирования грунтов CPT (Cone Penetration Test), CPTU (Piezocone Cone Penetration Test) с целью их классификации и стратификации. Подробный обзор методов зондирования приведен в работах¹ [1]. Следует заметить, что задача классификации органических или органо-минеральных грунтов, так же как и просадочных и набухающих, отмеченными методами не решена до сих пор.

Согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация», классификация грунтов включает следующие таксономические единицы, выделяемые по группам признаков: класс (подкласс) — по природе структурных связей; тип (подтип) — по генезису; вид (подвид) — по вещественному, петрографическому или литологическому составу; разновидности — по количественным показателям состава, строения, состояния и свойств грунтов.

В настоящее время CPT-методы классификации позволяют определять разновидности грунтов по количественным показателям, некоторые из них по показателям

состава грунтов. В большинстве случаев классификация грунта заменяется определением *типа поведения грунта* (Soil Behavior Type) [16–19], разделяя их на сыпучие и связные.

В процессе SPT (Standard Penetration Test) испытаний, в отличие от CPT, отбираются образцы грунта, что позволяет выполнить визуальную классификацию, которая затем может быть улучшена лабораторными испытаниями (содержание влаги, пределы пластичности, гранулометрический состав и др.). В этом случае классификация является более точной, так как используются группы признаков, приведенные в ГОСТ 25100-2011 или ASTM D2487 «Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)».

В то же время CPT — это более простой и быстрый метод полевых исследований, который может обеспечить непрерывное зондирование грунтов с глубиной. CPT-испытания проводятся путем вдавливания в массив исследуемых грунтов цилиндрического зонда с конусным наконечником, измеряя ряд параметров, таких как лобовое сопротивление, силы трения, избыточное поровое давле-

¹ Hossain M.I., 2018. Evaluation of undrained shear strength and soil classification from cone penetration test. Thesis for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA.

Корреляция между R_f и типом грунта [5]
Correlation between R_f and soil type [5]

№	Тип грунта	Коэффициент трения R_f , %
1	Крупный песок с гравием и мелкозернистым песком	1,2–1,6
2	Пылеватый песок	1,6–2,2
3	Опесчаненные глинистые грунты	2,2–3,2
4	Глинисто-суглинистые и суглинистые грунты	3,2–4,1
5	Глина	4,1–7,0
6	Торф	Более 7

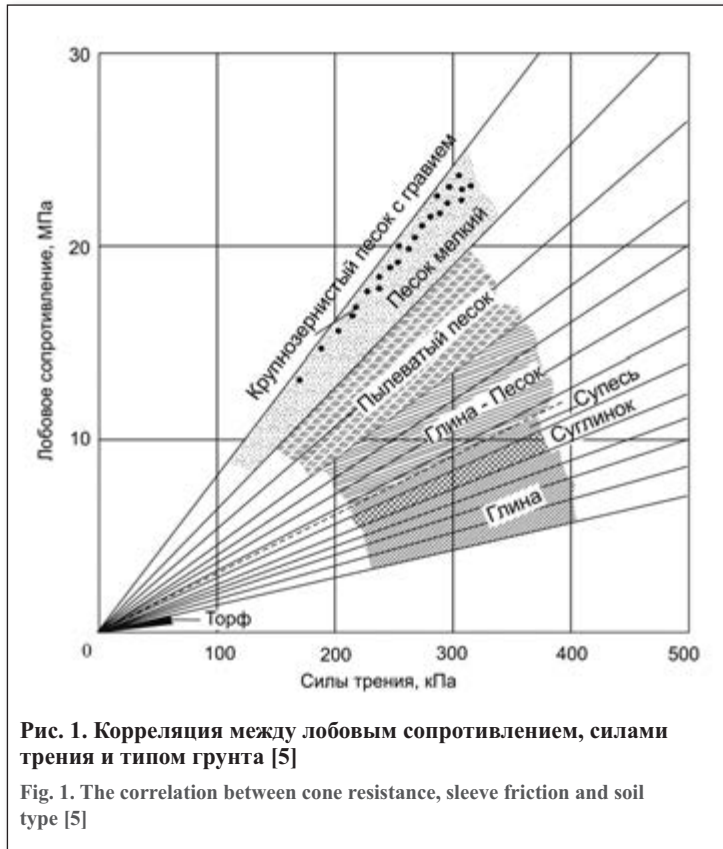


Рис. 1. Корреляция между лобовым сопротивлением, силами трения и типом грунта [5]

Fig. 1. The correlation between cone resistance, sleeve friction and soil type [5]

ние, скорость поперечных волн и др. Одним из самых ранних применений СРТ является его использование для классификации типа поведения грунта, которая разделяет грунты на сыпучие и связные с различными механическими свойствами. В этом основное отличие от методов классификации грунтов, где используются преимущественно их физические характеристики (в России ГОСТ 25100-2011 и США ASTM D2487), что требует большего времени и усилий.

В конце 80-х годов XX в. и позднее были предложены диаграммы для классификации грунтов по данным СРТ с использованием лобового сопротивления q_c и коэффициента трения R_f или из данных СРТУ с использованием скорректированного лобового сопротивления q и давления поровой воды [3]. Эти диаграммы были разработаны путем сравнения и корреляции между профилями данных СРТ/СРТУ и базами данных о типе грунтов, полученных традиционным методом классификации ASTM D2487. Согласно Б.Дж. Дугласу (B.J. Douglas) и Р.С. Олсену (R.S. Olsen) [7], СРТ-классификационные диаграммы не могут обеспечить точный

прогноз типа грунта на основе свойств, а, скорее, могут служить ориентиром в его типе поведения. Корреляция между составом грунта и механическими свойствами не проста, особенно в переходных зонах от одного типа к другому, что приводит к вероятности неправильной классификации грунта с использованием известных диаграмм СРТ-классификации. Для учета подобной вероятности ошибки Ч. Чжан (Z. Zhang) и М.Т. Тумаи (M.T. Tumay) [26] разработали статистическую оценку вероятностной области и методы нечеткой классификации грунтов по данным СРТ, которые учитывают неопределенность в корреляции между составом и механическим поведением. Метод оценки вероятностной области обеспечивает профиль вероятности или вероятность наличия каждой разновидности грунта (глинистый, илистый и песчаный) с глубиной. В то же время метод нечеткой классификации определяет три типа грунта на основе определенности его поведения: высокая вероятность глинистого грунта (HPC — Highly Probable Clayey Soil), высокая вероятность смешанного грунта (суглинок и супесь) (HPM — Highly Probable Mixed Soil) и высокая вероятность песчаного грунта (HPS — Highly Probable Sandy Soil).

Для облегчения использования СРТ-классификации грунтов в Центре исследований транспорта Луизианы (Louisiana Transportation Research Center) была разработана программа Visual Basic MS-Windows, включающая различные диаграммы классификации СРТ/СРТУ, разработанные П.К. Робертсоном (P.K. Robertson) [16], Б.Дж. Дугласом (B.J. Douglas) и Р.С. Олсену (R.S. Olsen) [7], Ч. Чжаном (Z. Zhang) и М.Т. Тумаем (M.T. Tumay) [26], а также Дж.Х. Шмертманном (J.H. Schmertmann) из отчета «Guidelines for cone penetration test: performance and design» (U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., USA, 1978). Подобные программы выполняют анализ профилей данных СРТ, используя выбранный метод СРТ-классификации [1, 2].

Диаграммы СРТ-классификации грунтов

Классификация грунта может быть выполнена путем анализа измеренных параметров зондирования. Общей тенденцией в СРТ-классификации грунтов является следующее:

- песчаные грунты обычно имеют высокое лобовое сопротивление q_c и низкий коэффициент трения $R_f = f_s/q_c$;
- мягкие глинистые грунты ($OCR = 1$) показывают низкое лобовое сопротивление и высокий коэффициент трения;
- органические грунты, такие как торф, имеют очень низкое лобовое сопротивление и очень высокий коэффициент трения;

— чрезмерно уплотненные грунты ($OCR \gg 1$) имеют тенденцию обеспечить более высокое лобовое сопротивление и более высокий коэффициент трения.

Традиционные методы классификации СРТ представляют собой диаграммы, основанные либо на лобовом сопротивлении конуса (q_c или q_t), коэффициенте трения R_f и поровом давлении u или на их нормализации относительно вертикального напряжения от собственного веса грунта σ_v . Эти диаграммы были разработаны путем прямой корреляции между параметрами СРТ-зондирования q_c , q_t , R_f , u и соответствующим типом грунта, определенным путем оценки его состава и физических характеристик в лабораторных условиях. Хотя почти все СРТ-методы дают конкретную классификацию для каждого слоя грунта по глубине пенетрации, методы статистической оценки вероятностной области и нечеткой классификации, предложенные Ч. Чжаном (Z. Zhang) и М.Т. Тумаем (M.T. Tumay) [26], учитывают состав грунтов, а не только их механическое поведение. Эти методы похожи на классические методы классификации грунтов по ГОСТ 25100-2011 и ASTM D2487 на основе состава и физических свойств.

Метод классификации Х.К.С. Бегеманна (H.K.S. Vegemann)

В 1965 г. Х.К.С. Бегеманн (H.K.S. Vegemann) [5] предложил диаграмму для СРТ-классификации грунтов, которая показана на рис. 1. Он связал классификацию с зависимостью между лобовым сопротивлением и силами трения.

Как видно из рис. 1, тип грунта является функцией отношения сил трения и лобового сопротивления, которое впоследствии стали называть коэффициентом трения R_f . Бегеманн Х.К.С. (Vegemann H.K.S.) получил, что каждому типу грунта соответствует свой диапазон коэффициента трения, что показано в табл. 1.

Метод Г. Санглерата (G. Sanglerat)

В 1974 г. Г. Санглерат (G. Sanglerat) с коллегами [20] предложили диаграмму по данным испытаний пенетрометром диаметром 80 мм, показанную на рис. 2. Диаграмма иллюстрирует зависимость лобового сопротивления конуса (логарифмическая шкала) от коэффициента трения (линейная шкала). Подобный способ отображения зависимости имеет очевидное преимущество показывать лобовое сопротивление как прямую функцию от коэффициента трения и, следовательно, типа грунта.

Метод классификации Дж.Х. Шмертманна (J.H. Schmertmann)

Предложенная Дж.Х. Шмертманном (J.H. Schmertmann) в отчете «Guidelines for cone penetration...» (U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., USA, 1978) диаграмма классификации грунта приведена на рис. 3. Основываясь на данных исследований на нескольких площадках, М.Т. Тумай (M.T. Tumay) в [26] и отчете «Field calibration of electric cone penetrometers in soft soils — executive summary» (U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., USA, 1985) модифицировал диаграмму Дж.Х. Шмертманна (J.H. Schmertmann), как показано на рис. 4. На диаграмме имеются четыре отдельных области. Это глины (clays), пески и суглинки (sandy and silty clays), супеси (clayey sands) и пылеватые пески и песок (silts and sand). Каждая область была разделена на зоны по клас-

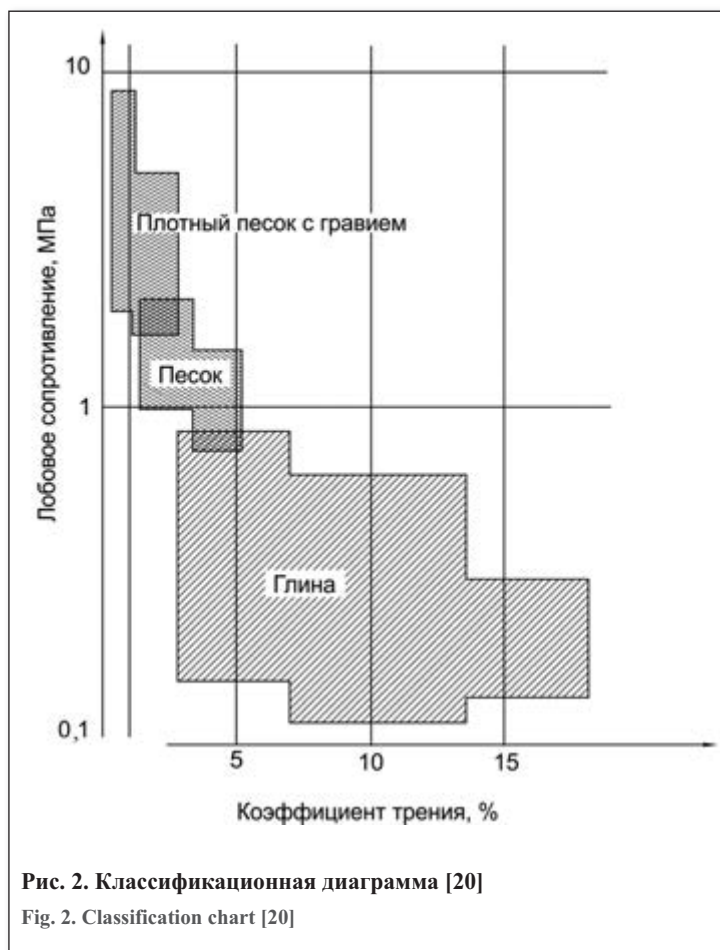


Рис. 2. Классификационная диаграмма [20]

Fig. 2. Classification chart [20]

сификации Дж.Х. Шмертманна (J.H. Schmertmann) с небольшими изменениями, чтобы учесть конкретные инженерно-геологические условия одной из площадок исследований. В результате предложена диаграмма (см. рис. 4), которая отражает изменение классификации грунта (по диагонали) от песка до супеси (sand to clayey sand), от супеси к суглинку (silt to sandy) и от суглинка к глине (silty clay to clay), характеризуемое уменьшением лобового сопротивления зонда и увеличением коэффициента трения.

Метод классификации Б.Дж. Дугласа (B.J. Douglas) и Р.С. Олсена (R.S. Olsen)

В 1980 г. начали использовать электрические зонды для профилирования грунтов. Это дало большую точность оценки параметров грунта, благодаря наличию датчиков, встроенных в зонд. Дуглас Б.Дж. (Douglas B.J.) и Олсен Р.С. (Olsen R.S.) [7] провели комплексную работу по корреляции между классификацией грунтов по Единой системе классификации грунтов (Unified Soil Classification System — USCS), США — ASTM D2487 и параметрами зондирования с целью разработки СРТ-метода классификации. Их метод был основан на обширных данных, собранных с площадок в западной части Соединенных Штатов. Диаграмма классификации Б.Дж. Дугласа и Р.С. Олсена (далее — Дугласа-Олсена) использует параметры зондирования: лобовое сопротивление q_c и коэффициент трения R_f , как показано на рис. 5. Диаграмма имеет четыре отдельных области: связные мелкозернистые (cohesive fine grained), связные и несвязные мелкозернистые (cohesive and noncohesive fine grained), несвязные крупно и мелкозернистые (noncohesive coarse and fine grained), и несвяз-

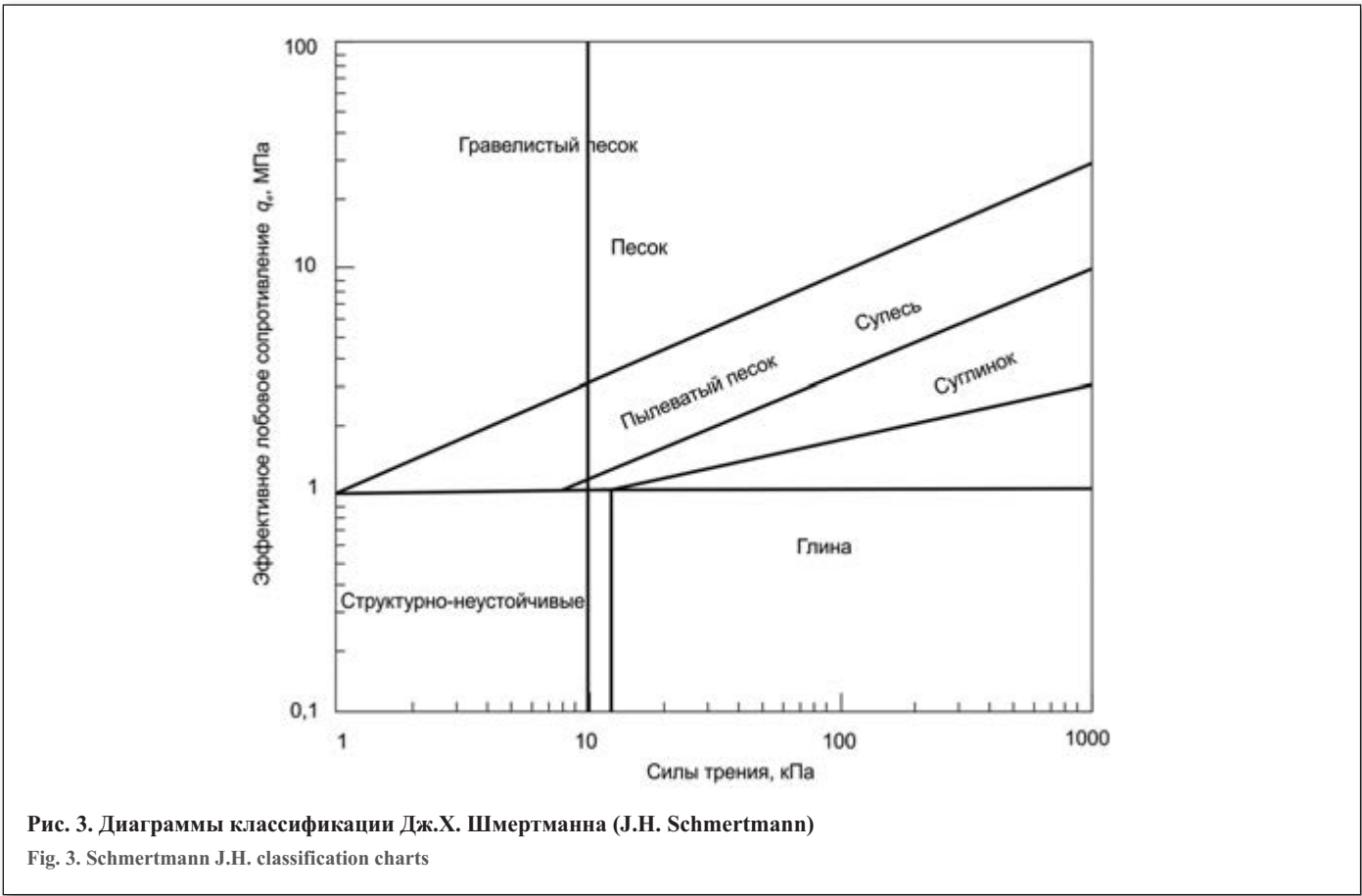


Рис. 3. Диаграммы классификации Дж.Х. Шмертманна (J.H. Schmertmann)
 Fig. 3. Schmertmann J.H. classification charts

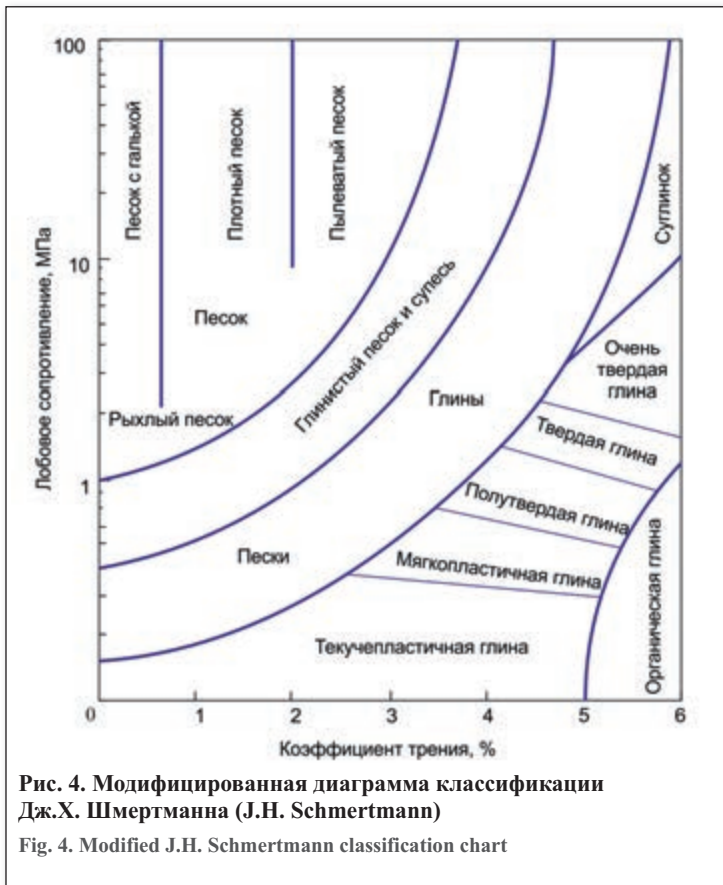


Рис. 4. Модифицированная диаграмма классификации Дж.Х. Шмертманна (J.H. Schmertmann)
 Fig. 4. Modified J.H. Schmertmann classification chart

ные крупнозернистые (noncohesive coarse grained). Диаграмма показывает изменение типа грунта по диагонали с разновидностями SP на SM на ML на CL на CH согласно

ASTM D2487 по мере того как лобовое сопротивление уменьшается, а коэффициент трения увеличивается.

Дуглас Б.Дж. (Douglas B.J.) и Олсен Р.С. (Olsen R.S.) показали, что СРТ-классификационные диаграммы не могут обеспечить точный прогноз типа грунта, основанный на его составе, а могут быть использованы только для определения типа поведения грунта.

В дополнение к диаграмме Дугласа-Олсена в 1982 г. Дж.Д. Вос (J.D. Vos) [25], основываясь на исследованиях грунтов Дании, предложил оценивать тип грунта, используя коэффициенты трения, которые подобны, но не идентичны Х.К.С. Бегеманну (H.K.S. Begemann).

Методы классификации П.К. Робертсона (P.K. Robertson)

В середине 1980-х гг. в университете Британской Колумбии была разработана одна из первых компьютеризированных диаграмм под названием «Классификация типа поведения грунтов» (Soil Behaviour Type Classification — SBT), что означает, что классификация основана на наблюдаемом механическом поведении, а не на размере частиц и других физических характеристиках грунтов.

Классификация выполняется с использованием диаграммы, на которой тип поведения грунта определяется введенным параметром, называемым индексом материала:

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \lg q_t)^2 + (\lg R_f + 1,22)^2}, \quad (1)$$

где $q_t = q_c + u_2(1 - a)$; $R_f = (f_s/q_c)100\%$. В случае применения зонда типа СРТ u_2 не измеряется; a — параметр конструкции зонда. Более подробное описание можно найти в работе [1].

Индекс материала является радиусом окружности с центром в верхнем левом углу рис. 6, а, б. На рис. 6, б, где отображаются данные зондирования электрическим зондом СРТ, показаны 12 зон, где семь и выше имеют тенденцию быть песчаными, а пять и ниже имеют тенденцию быть глинистыми.

Позднее, в начале 1990 г., стали применять зонды с возможностью измерения порового давления (СРТУ-пъезозонд). Поскольку измерения сил трения на муфте трения зонда менее точны, чем лобовое сопротивление, то полагают, что получение данных лобового сопротивления и порового давления может улучшить классификацию грунтов путем использования трех параметров зондирования q_t , f_s , u_2 . Робертсон П.К. (Robertson P.K.) с коллегами [17] были первыми, кто предложил метод классификации типа поведения грунта, основанный на измерениях пьезозондом всех трех отмеченных параметров. Они предложили выполнять классификацию с использованием двух диаграмм (см. рис. 6, а, б). Первая использует скорректированное лобовое сопротивление q_t и коэффициент трения R_f в качестве входных данных. Вторая диаграмма использует q_t и параметр порового давления B_q в качестве входных данных (см. рис. 6, а). Параметр B_q определяется следующим образом:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}}, \quad (2)$$

где u_0 — гидростатическое давление в грунтовой воде, u_2 — избыточное поровое давление, σ_{v0} — полное напряжение от собственного веса грунта.

Робертсон П.К. (Robertson P.K.) предложил диаграмму классификации с 12 различными типами поведения грунтов — от чувствительного мелкозернистого (зона 1) до песка и опесчанной глины (зона 12), как показано на рис. 6, б. В том случае, если грунт попадает в две различные зоны на двух диаграммах, требуется принятие решения инженер-геологом о типе грунта.

Для испытаний электрическим зондом СРТ, где измеряются только два параметра q_c и f_s , можно использовать правую диаграмму (см. рис. 6, б). Ошибка (влияние порового давления) в использовании нескорректированного лобового сопротивления q_c будет влиять только на данные в нижней части диаграммы, где нормализованное лобовое сопротивление меньше 1,0 МПа. Эта часть диаграммы предназначена для мягких мелкозернистых грунтов, где q_c может быть небольшим, а поровое давление u_2 большим.

Позднее, в 1990 г. П.К. Робертсон (P.K. Robertson) предложил учитывать глубину испытаний введением нормализации лобового сопротивления напряжениями от собственного веса грунта σ_{v0} . Нормализация выполнена следующим образом:

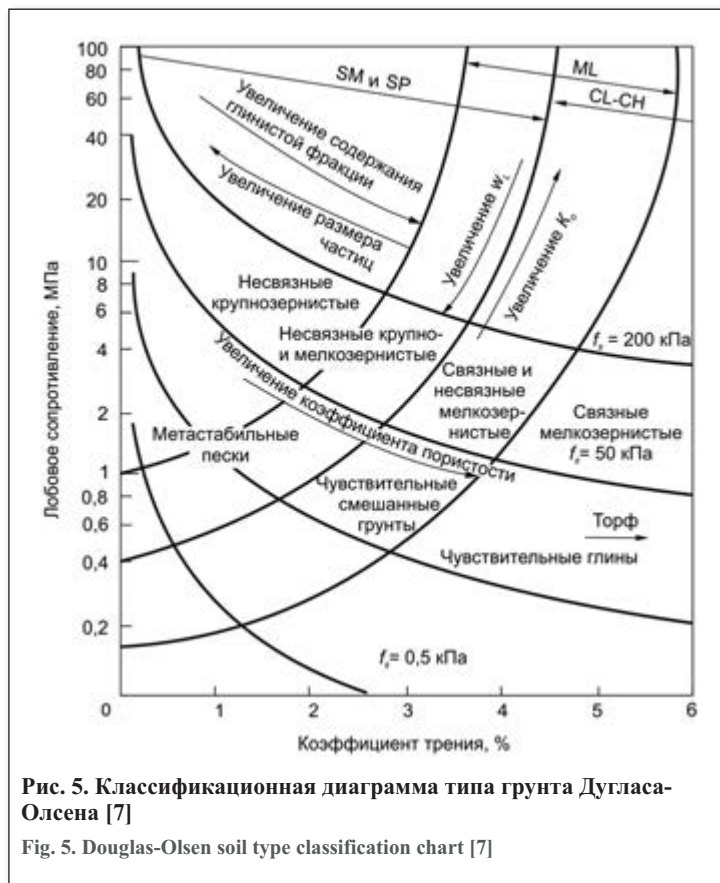


Рис. 5. Классификационная диаграмма типа грунта Дугласа-Олсена [7]

Fig. 5. Douglas-Olsen soil type classification chart [7]

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{v0} = \sum z_i \gamma_i$; $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$; здесь u_0 — гидростатическое давление в грунтовой воде; $q_t = q_c + u_2(1 - a)$; z — глубина; γ — удельный вес грунта; u_2 — избыточное поровое давление; a — параметр конструкции зонда.

В случае применения зонда типа СРТ u_2 не измеряется и $q_t = q_c$.

Нормализация порового давления выполняется следующим образом:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} = \frac{\Delta u}{q_n}, \quad (4)$$

а коэффициента трения, как:

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

На новой нормализованной диаграмме (рис. 7) 12 зон заменены девятью зонами. Дополнительно включена зона

Таблица 2
Table 2

Корреляция между R_f и типом грунта [25] Correlation between R_f and soil type [25]		
№	Тип грунта	Коэффициент трения R_f , %
1	Крупный песок и гравий	Менее 0,5
2	Мелкий песок	1,0–1,5
3	Супесь	1,5–3,0
4	Глина	3,0–7,0
5	Торф	Более 7

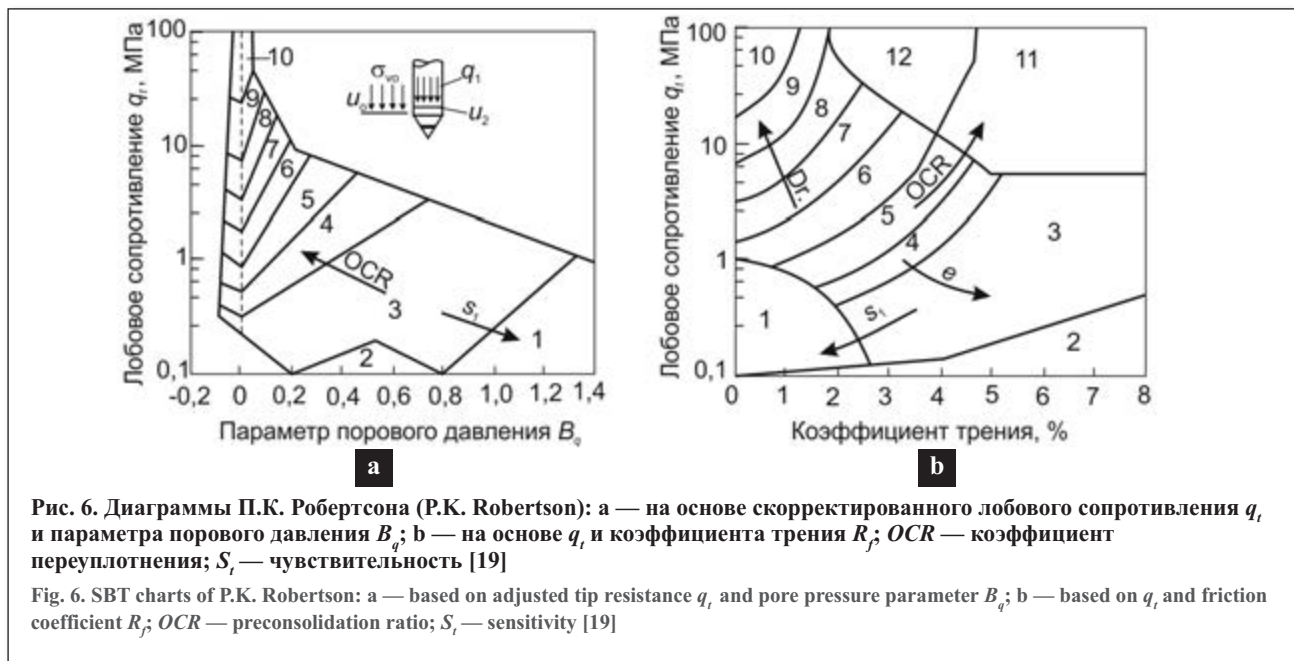


Таблица 3
Table 3

Классификация типа поведения грунта (SBT) [19]
Classification of the type soil behavior (SBT) [19]

Номер типа грунта	Оригинальное наименование	Приблизительный российский аналог классификации
1	Sensitive fine grained	Чувствительный тонкодисперсный грунт
2	Organic soil-peats	Органические грунты-торфа
3	Clay	Глина
4	Silty clasy to clay	Глина илистая-глина
5	Clayey silt to silty clay	Ил глинистый-глина илистая
6	Sandy silt to clayey silt	Ил глинистый-ил опесчаненный
7	Silty sand to sandy silt	Ил опесчаненный-пылеватый песок
8	Sand to silty sand	Пылеватый песок-песок
9	Sand	Песок
10	Cravelly sand to sand	Песок-гравелистый песок
11	Very stiff fine-grained	Очень твердый тонкодисперсный грунт
12	Sand to clayey sand	Песок-глинистый песок

(по диагонали в центральной части), которая представляет приблизительно нормально уплотненный грунт ($OCR = 1$). Диаграммы учитывают изменения нормализованных СРТ и СРТУ-данных от коэффициента переуплотнения OCR, возраста и чувствительности S_f для мелкозернистых грунтов, где процесс пенетрации обычно недренированный, и OCR, возраста, цементации и угла внутреннего трения для сыпучих грунтов, где пенетрация, как правило, дренированная.

Согласно диаграммы на рис. 7, грунты, которые расположены в зонах 6 и 7, представляют дренированное поведение при пенетрации, тогда как грунты в зонах 1, 2, 3 и 4 представляют недренированное поведение. Грунты в зонах 5, 8 и 9 могут представлять собой частично дренированное поведение. Преимущество измерения порового давления при пенетрации заключается в возможности более точной оценки условий дренирования.

Последняя нормализованная диаграмма рекомендуется при исследованиях, когда глубина пенетрации превышает 30 м. Как отмечено ранее, она учитывает рост напряжений от собственного веса грунта с глубиной. Как видно из табл. 4, нормализованная классификация ближе к отечественной по сравнению с классификацией табл. 3.

В публикации 1990 г. П.К. Робертсон (P.K. Robertson) предполагает, что диаграммы на рис. 6, 7 по-прежнему носят глобальный характер и должны использоваться только в качестве руководства для определения типа поведения грунта на основе данных СРТ и СРТУ. Такие факторы, как изменения в истории напряжений, напряжения от собственного веса грунта, чувствительность, сжимаемость, структура, литологический состав и коэффициент пористости, также будут влиять на классификацию, и пока еще не реализованы на практике. Однако более чем 30-летняя практика применения диаграмм

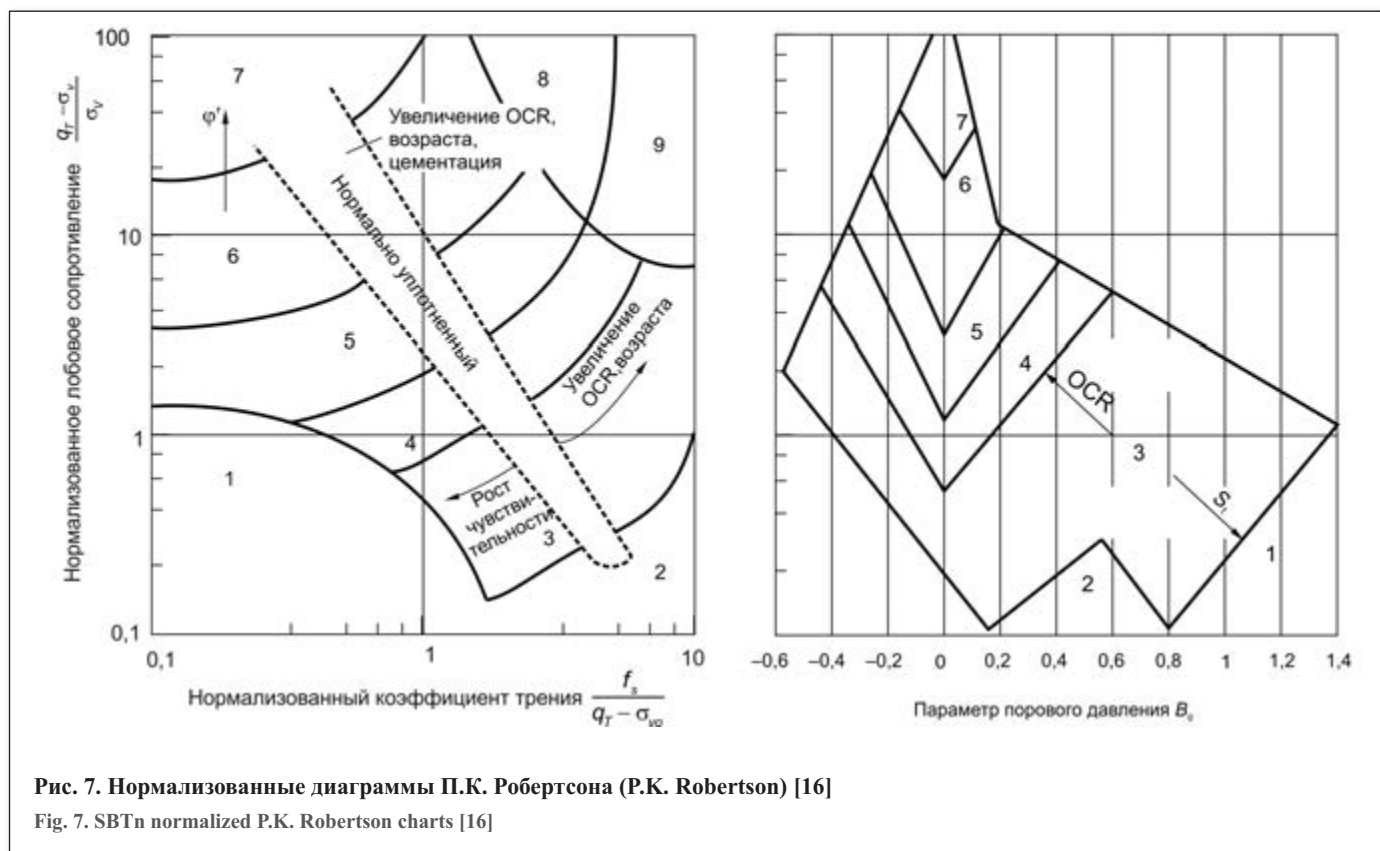


Рис. 7. Нормализованные диаграммы П.К. Робертсона (P.K. Robertson) [16]

Fig. 7. SBTn normalized P.K. Robertson charts [16]

Таблица 4
Table 4

Классификация типа поведения грунта (SBTn) [16] Classification of the type soil behavior (SBTn) [16]

Номер типа грунта	Оригинальное наименование	Приблизительный российский аналог классификации
1	Sensitive fine grained	Чувствительный тонкодисперсный грунт
2	Organic soil-peats	Органические грунты-торфа
3	Clays-clay to silty clay	Глина-суглинок
4	Silt mixtures-clayey silt to silty clay	Суглинок-супесь
5	Sand mixtures-silty sand to sandy silt	Супесь-песок
6	Sands-clean sand to silty sand	Песок-пылеватый песок
7	Cravelly sand to sand	Песок-гравелистый песок
8	Veru stiff sand to clayey sand	Пылеватый песок-песок глинистый
9	Very stiff, fine grained	Очень твердые, мелкозернистые

П.К. Робертсона (P.K. Robertson) в различных странах и различных инженерно-геологических условиях показала надежность и эффективность СРТ и СРТУ-классификации грунтов. Этот метод был оценен самим П.К. Робертсоном (P.K. Robertson) [17, 18] путем использования данных многочисленных испытаний и рекомендован к применению без изменений основного подхода.

В одной из последних публикаций П.К. Робертсон (P.K. Robertson) [18] представил обобщение и модернизацию предложенной им ранее классификации типа поведения грунтов по СРТ-данным с описаниями на основе поведения для каждой группы грунтов и учетом таких факторов, как микроструктура, которая определяет многие свойства, а также сжимаемость, тиксотропия, цементация и др.

Классификация Дж.А. Шнайдера (J.A. Schneider)

Предложенная Дж.А. Шнайдером (J.A. Schneider) [21, 22] классификация является развитием метода П.К. Робертсона (P.K. Robertson) и основана на интерпретации данных зондирования с измерением порового давления. Диаграмма типа поведения грунта, основанная на нормализации лобового сопротивления ($Q = q/\sigma'_{v0}$) и нормализации избыточного порового давления ($\Delta u/\sigma'_{v0}$) была предложена с целью разделения условий поведения грунта на дренированное, недренированное или частично дренированное. Пример использования подобной классификации показан на рис. 8.

Метод классификации Б.Х. Феллениуса (B.H. Fellenius) и А. Эслами (A. Eslami)

Феллениус Б.Х. (Fellenius B.H.) и Эслами А. (Eslami A.) [9] рассмотрели все ранее опубликованные

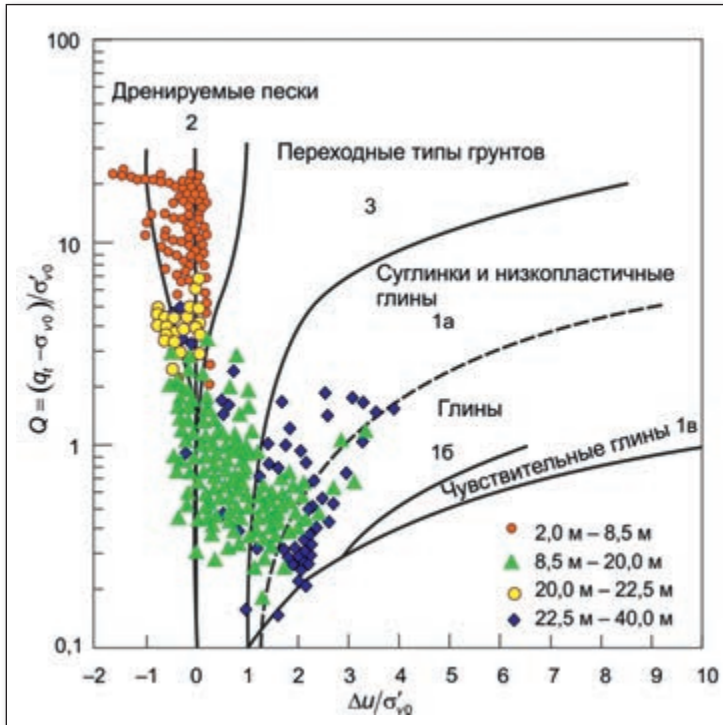


Рис. 8. Классификация грунтов из СPTU [23]
 Fig. 8. Classification of soils from CPTU [23]

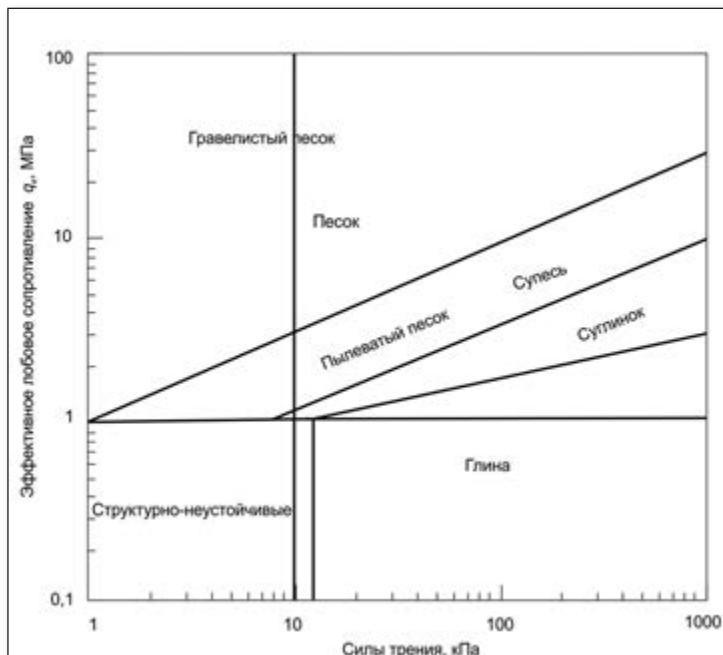


Рис. 9. Корреляция между силами трения, эффективным лобовым сопротивлением и типом грунта [9]
 Fig. 9. Correlation between sleeve friction, effective cone resistance and soil type [9]

методы классификации грунтов с использованием СРТ и СPTU и в 1997 г. предложили новый метод с использованием результатов испытаний пьезозондом [8]. Они ввели новый параметр $q_e = q_t - u_2$, назвав его «эффективное лобовое сопротивление» для классификации грунтов (рис. 9). Важной особенностью их исследований является то, что они сравнили свою классификацию с предложен-

ными ранее и нашли хорошее совпадение с методом П.К. Робертсона (P.K. Robertson).

Было показано, что значение q_e является характерным параметром при оценке сопротивления грунта по боковой поверхности сваи и под ее острием [8]. Робертсон П.К. (Robertson P.K.) [16] заметил, что измеренное давление поровой воды является функцией расположения датчика порового давления u_1 или u_2 . Следовательно, значение q_e никоим образом не может являться функцией эффективных напряжений в общепринятом смысле. Вследствие того, что до сих пор не создана «эффективная» муфта трения, силы трения измеряются достаточно приблизительно, и в плотных крупнозернистых грунтах значение q_e лишь незначительно отличается от значения q_t . В противоположность этому зондирование в мелкозернистых водонасыщенных грунтах может привести к значительным величинам избыточного давления поровой воды, когда значение q_e намного меньше q_t .

Диаграмма Б.Х. Феллениуса и А. Эслами (далее — Феллениуса-Эслами) проста в использовании и не требует корректировки для учета влияния эффективных и полных напряжений от собственного веса грунта. Диаграмма предназначена главным образом для анализа типа грунта из СPTU-данных. Что касается границ между основными типами грунтов (глина, суглинок, песок и гравий), в международной и североамериканской практике полагают, что не существует различия в том, как наименование типа грунта изменяется в соответствии с содержанием, отличным от основной фракции грунта.

Диаграмма профилирования грунтов, основанная на методах Х.К.С. Бегеманна (H.K.S. Vegemann) и Б.Х. Феллениуса-А. Эслами, может быть легко расширена путем добавления разграничения по прочности и консистенции тонкодисперсных грунтов, степени плотности и углу внутреннего трения сыпучих грунтов в соответствии с предпочтениями пользователя или в соответствии с применяемыми стандартами. Без сомнения, СPTU-данные с конкретной площадки инженерно-геологических изысканий могут быть использованы для дальнейшей детализации диаграммы классификации грунтов и определения их границ [9].

Кроме рассмотренных, известны другие методы СРТ и СPTU-классификации. Большинство из них основано на работе П.К. Робертсона (P.K. Robertson) [19]. Их описание можно найти в работах [11, 14, 15], а также в отчете Р. Ларссона (R. Larsson) и М. Мулабдиха (M. Mulabdic) «Piezocone tests in clay» (Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden, 1991).

Метод оценки вероятностной области

Вероятность неверного определения типа грунта с использованием традиционных СРТ-методов, особенно в переходной зоне от одного типа грунта к другому, явилась мотивацией разработки метода, основанного на вероятностной оценке данных [4, 24]. Этот метод классификации СРТ учитывает неопределенность корреляции между составом и механическим поведением грунта.

Метод оценки вероятностной области дает профиль вероятности или вероятность наличия каждого типа грунта (глинистый, илистый и песчаный) с глубиной, тогда как метод нечеткой классификации определяет три типа грунта на основе поведения грунта: НРС, НРМ и НРС, которые рассмотрены ниже.

В этом методе конформное отображение было выполнено на диаграмме Дугласа-Олсена (см. рис. 5) путем замены осей диаграммы из СРТ-данных q_c , R_f на индекс классификации грунта U [3]. Последний обеспечивает профилирование типа грунта по глубине с вероятностью принадлежности к различным типам, которая более реалистично и непрерывно отражает характеристики грунтов в полевых условиях, и включает в себя пространственное изменение типов.

Статистическая корреляция была найдена между индексом U и типом грунта, определенным на основе объединенной классификационной системы USCS, опубликованной в ASTM D2487. Закон нормального распределения U был применен для каждого отсчетного USCS типа грунта (GP, SP, SM, SC, ML, CL и CH). Каждое значение U соответствует нескольким типам грунтов с различной вероятностью. Граничные значения были использованы для разделения оси U на семь областей (интервалов), как показано на рис. 10. Типы грунта были дополнительно перестроены на три группы: песчаные и гравийные (GP, SP, SM), илистые (SC и ML) и глинистые (CL и CH). Рис. 10 также дает вероятность наличия каждой группы грунта в каждой области. Метод дает постоянную вероятность каждого типа грунта (представленную ступенчатой линией) независимо от значения в пределах одной и той же области (от R_1 до R_7 на рис. 10). Это допускает внезапное падение значений вероятностей U через границу от одной области к другой. Данный метод был позднее модифицирован с целью обеспечения плавного перехода вероятности значения (кривая линия) U при построении непрерывного профиля вероятности типов грунта с глубиной. Пример профиля U по сравнению с q_c и R_f с соответствующими профилями вероятности грунта для одной из площадок инженерно-геологических изысканий показан на рис. 11.

Нечеткая классификация

Большинство существующих методов СРТ-классификации основано на статистической корреляции между СРТ-параметрами и USCS классификацией грунтов и, следовательно, приводит в итоге к идентификации грунта в соответствии с его механическим поведением. В отличие от этого, метод нечеткой классификации грунта основан на поведении грунта, определяемом характером лобового сопротивления и сил трения. В нечеткой СРТ-классификации определены три типа грунтов: HPC (Highly Probable Clayey Soil — высокая вероятность глинистого грунта); HPM (Highly Probable Mixed Soil — высокая вероятность смешанного типа грунта, суглинков и супесь) и HPS (Highly Probable Sandy Soil — высокая вероятность песчаного грунта). Для каждой из них предложены эмпирические функции $\mu_o(U)$, которые представляют собой либо кривую «S», либо кривую «колокол» с максимальным значением 1,0 для каждого типа грунта, как показано на рис. 10. Однако, как видно из рис. 10, маловероятно, чтобы все три значения $\mu_o(U)$ имели максимум одновременно, а накопленная сумма зависит от значения параметра U . Эти эмпирические функции примерно связывают количественные изменения с качественными изменениями состава и свойств грунта, отражая его общие свойства. Изменение происходит постепенно от одного типа грунта к другому. Профили нечеткой функции, как U -образные профили

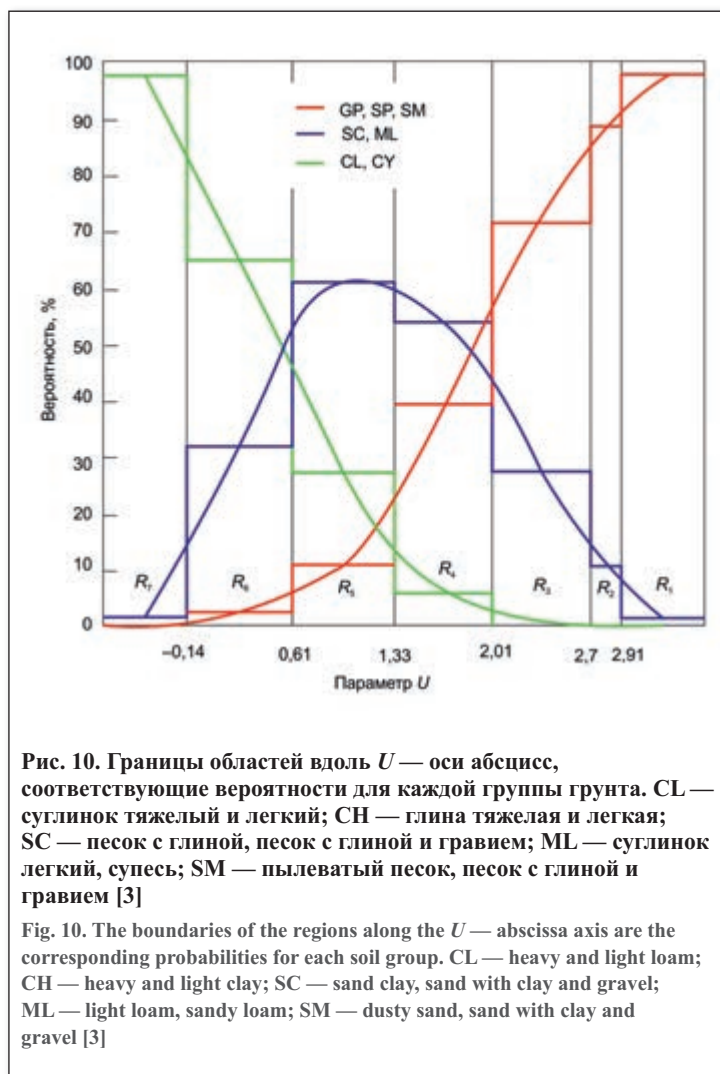


Рис. 10. Границы областей вдоль U — оси абсцисс, соответствующие вероятности для каждой группы грунта. CL — суглинок тяжелый и легкий; CH — глина тяжелая и легкая; SC — песок с глиной, песок с глиной и гравием; ML — суглинок легкий, супесь; SM — пылеватый песок, песок с глиной и гравием [3]

Fig. 10. The boundaries of the regions along the U — abscissa axis are the corresponding probabilities for each soil group. CL — heavy and light loam; CH — heavy and light clay; SC — sand clay, sand with clay and gravel; ML — light loam, sandy loam; SM — dusty sand, sand with clay and gravel [3]

и q_c -профили для тех же инженерно-геологических условий показаны на рис. 11.

Методы классификации, основанные на построении нейронных сетей

В последние годы компьютерные методы, такие как нечеткая логика (Fuzzy Logic) и, в частности, искусственные нейронные сети (Artificial Neural Networks — ANNs), благодаря их значительным возможностям, стали использоваться в качестве желательных подходов для создания систем цифровых карт грунтов и их классификации [4, 6, 9, 10, 12, 13].

В работе [13] приведены результаты исследований применимости многослойной нейронной сети прямого распространения (Multi-Output Generalized Feed Forward Neural Network — GFNN) с использованием СРТU-данных с целью разработки региональной карты грунтов на юго-западе Швеции. Тип поведения грунта (Soil Behavior Type — SBT) [19] и индекс поведения типа грунта [11], предсказанные GFNN-моделью, были преобразованы в двухмерную типовую диаграмму и затем сопоставлены с известными методами классификации грунтов (рис. 12).

Точность прогнозируемого индекса материала I_c на профиле типа грунта для каждой точки испытаний также сравнивалась с другими известными методами классификации грунтов [7, 26] и, кроме того, с данными лабораторных и полевых испытаний в районе исследований. Как пример, одна из исследованных точек испытаний, принад-

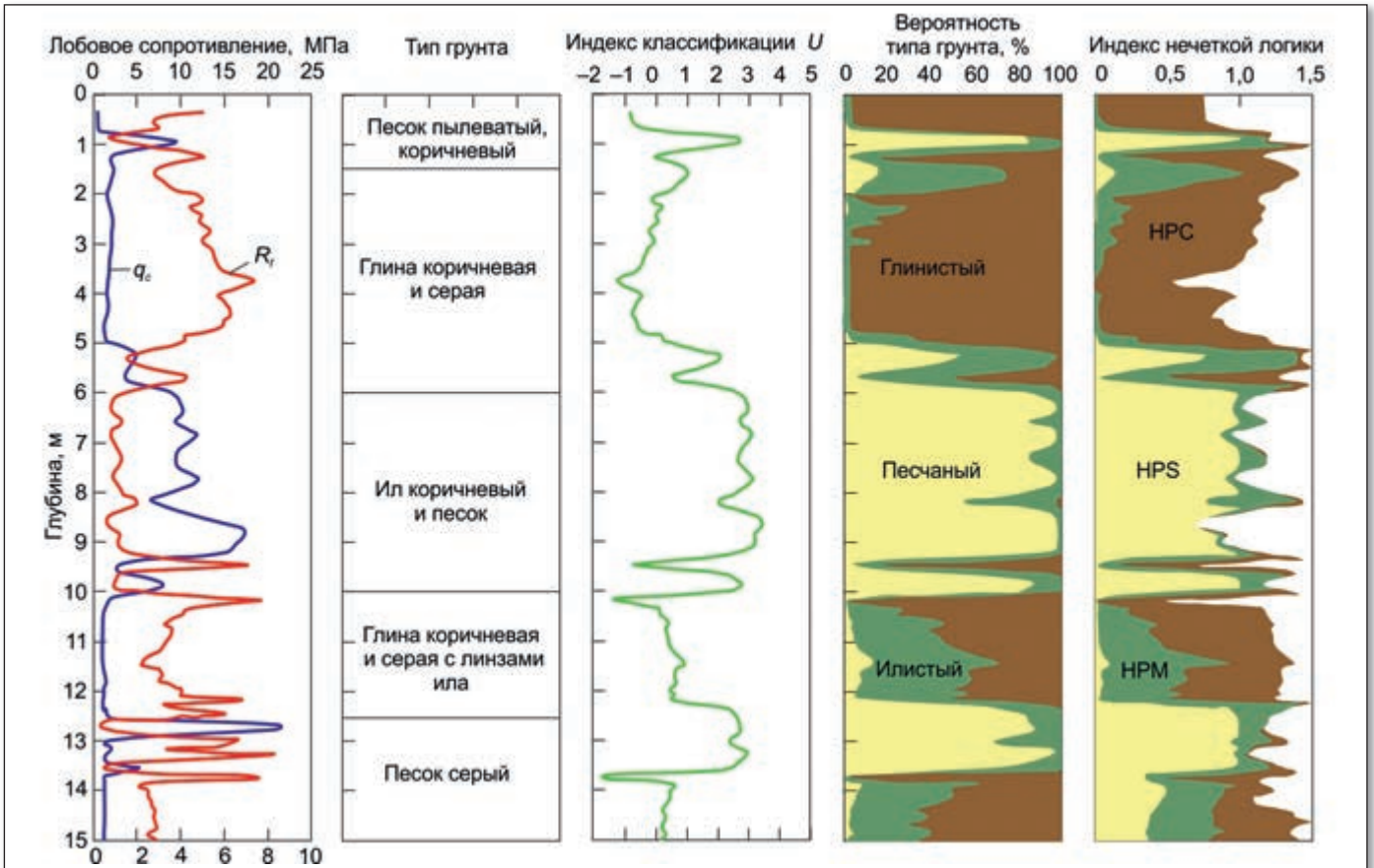


Рис. 11. Вероятностные профили и профили нечеткой функции [4]

Fig. 11. Probabilistic profiles and fuzzy function profiles [4]

лежащая к проверочным наборам данных, показана на рис. 12. Для представленных контрольных точек испытаний была использована USCS-классификация, которая классифицирует грунты на основе текстуры и размера частиц в разных группах для инженерно-геологических целей, и может применяться к большинству неконсолидированных материалов (характеристика состоит из двух букв: первая указывает на тип грунта, вторая соответствует классификации и градации по пластичности). М и С обозначают суглинок и глину, L показывает низкую пластичность, соответственно. Как видно из рис. 12, I_c полученный GFNN, хорошо согласуется как с USCS-данными, так и CPTU-диаграммами типа грунта. Можно заметить, что диаграмма П.К. Робертсона (P.K. Robertson) [19] способна охватить большие классы, определенные в USCS, в отличие от этого метод Ч. Чжана (Z. Zhang) и М.Т. Тумая (M.T. Tumaу) [26] показывает разновидность грунта, которую в USCS классифицируется как CL, ML и CH (рис. 12). Метод, предложенный Б.Дж. Дугласом (B.J. Douglas) и Р.С. Олсеном (R.S. Olsen) [7], также хорошо классифицировал типы грунтов в группе CL–CH (рис. 11).

Результаты анализа также показали, что использование параметра I_c П.К. Робертсона (P.K. Robertson) [19] не только более надежно, но и может быть более логичным для классификации грунтов в инженерных приложениях и инженерно-геологических исследованиях.

Сравнение методов классификации

В работе [4] было выполнено сравнение различных методов классификации: по области вероятностной оцен-

ки [24]; нечеткой классификации [4]; метода Дж.Х. Шмертманна (J.H. Schmertmann), опубликованного в отчете «Guidelines for cone penetration...» (U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., USA, 1978); метода Б.Дж. Дугласа (B.J. Douglas) и Р.С. Олсена (R.S. Olsen) [7]; а также метода П.К. Робертсона (P.K. Robertson) [19] с использованием данных, полученных с пяти площадок в Луизиане (США) в результате CPT и CPTU-испытаний. На каждой площадке были отобраны образцы грунтов для стандартной USCS-классификации, а вблизи скважин выполнено CPT- и CPTU-зондирование. Стандартная классификация грунтов по ASTM D2487 показана на рис. 13 в первом столбце, а классификация, основанная на вероятностном подходе, на рис. 13 в столбцах 2–5.

На рис. 14, 15 представлены результаты классификации грунтов, полученные различными CPT-методами. Сравнения показывают, что методы CPT-классификации в целом способны идентифицировать тип грунта с приемлемой точностью. Различные CPT-методы классификации дали близкое совпадение типа поведения грунтов и стандартной классификации ASTM D2487. Среди различных методов область вероятностной оценки и нечеткие методы CPT-классификации больше подходят для обеспечения непрерывного и точного профилирования типа грунта с глубиной, что делает их легкими для реализации в сочетании с другими CPT-методами.

Эффект коррекции лобового сопротивления q_t из-за действия порового давления, измеренного в основании конуса зонда u_2 , по CPT-классификации показан путем сравнения с использованием q_c (CPT) и q_t (CPTU)

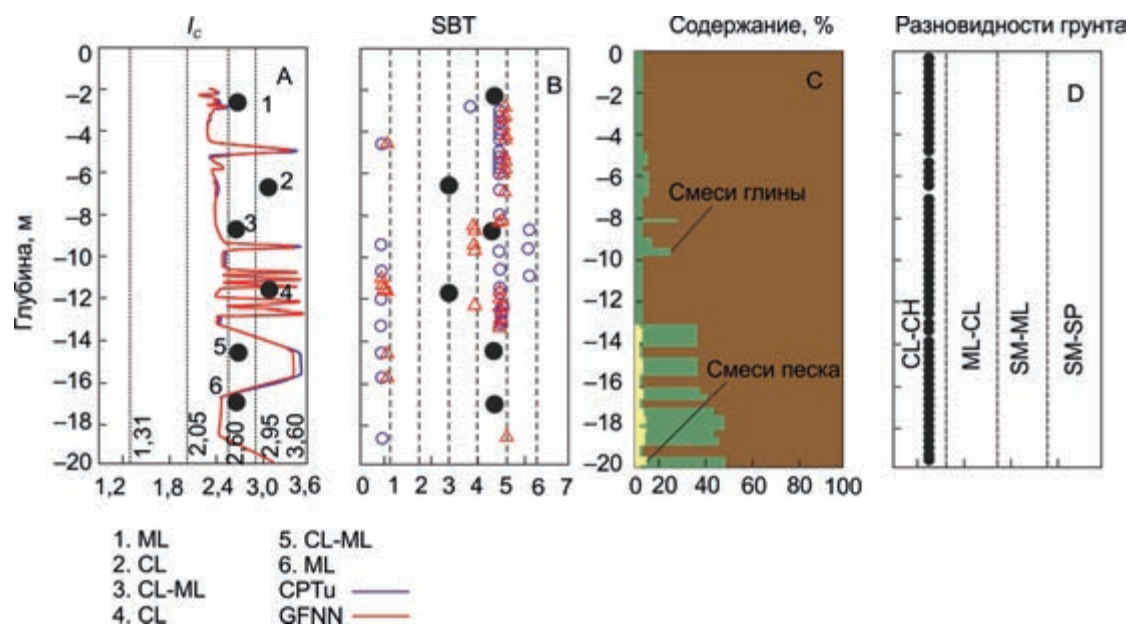


Рис. 12. Сравнение предсказанных I_c и SBT моделью GFNN и CPTu-пьеозонд классификацией с данными USCS традиционной системой классификации методом нечеткой логики [26] и методом Дугласа-Олсена [7] (из [13])

Fig. 12. Comparison of predicted I_c and SBT classification by GFNN and CPTu classification with data USCS classical classification system using the fuzzy logic method [26] and the Douglas-Olsen method [7] (from [13])

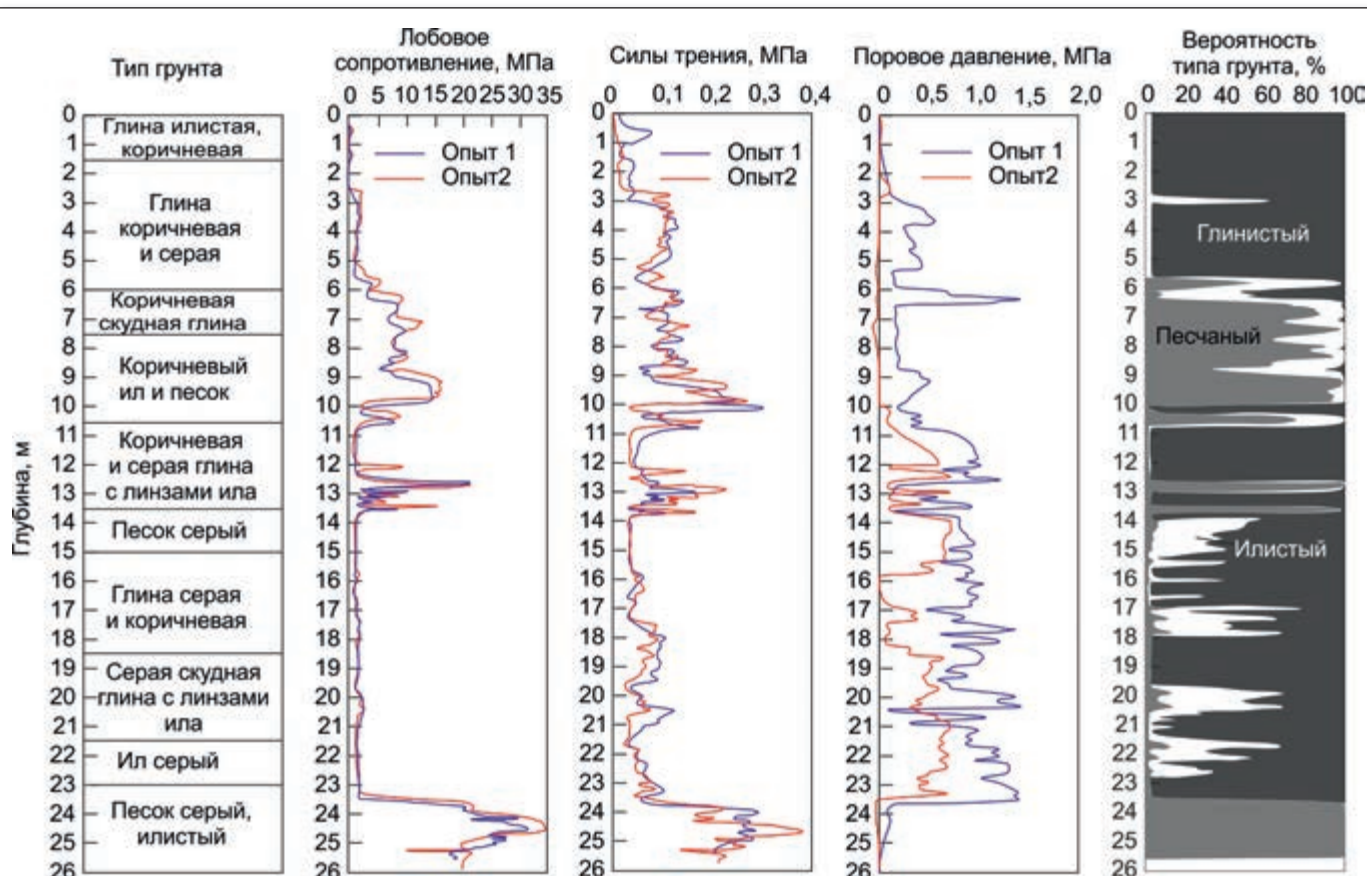


Рис. 13. Результаты измерений параметров зондирования и классификации грунтов [4]

Fig. 13. The results of measurements of cone penetration test parameters and soil classification [4]

(см. рис. 15, *a, b*). Результаты практически одинаковы за исключением данных, находящихся в нижней правой части диаграмм (см. рис. 15, *b*), на которые влияет выпол-

ненная коррекция лобового сопротивления. Это говорит о том, что СРТ-классификацию можно выполнять как СРТ-зондированием, так и СPTU-зондированием.

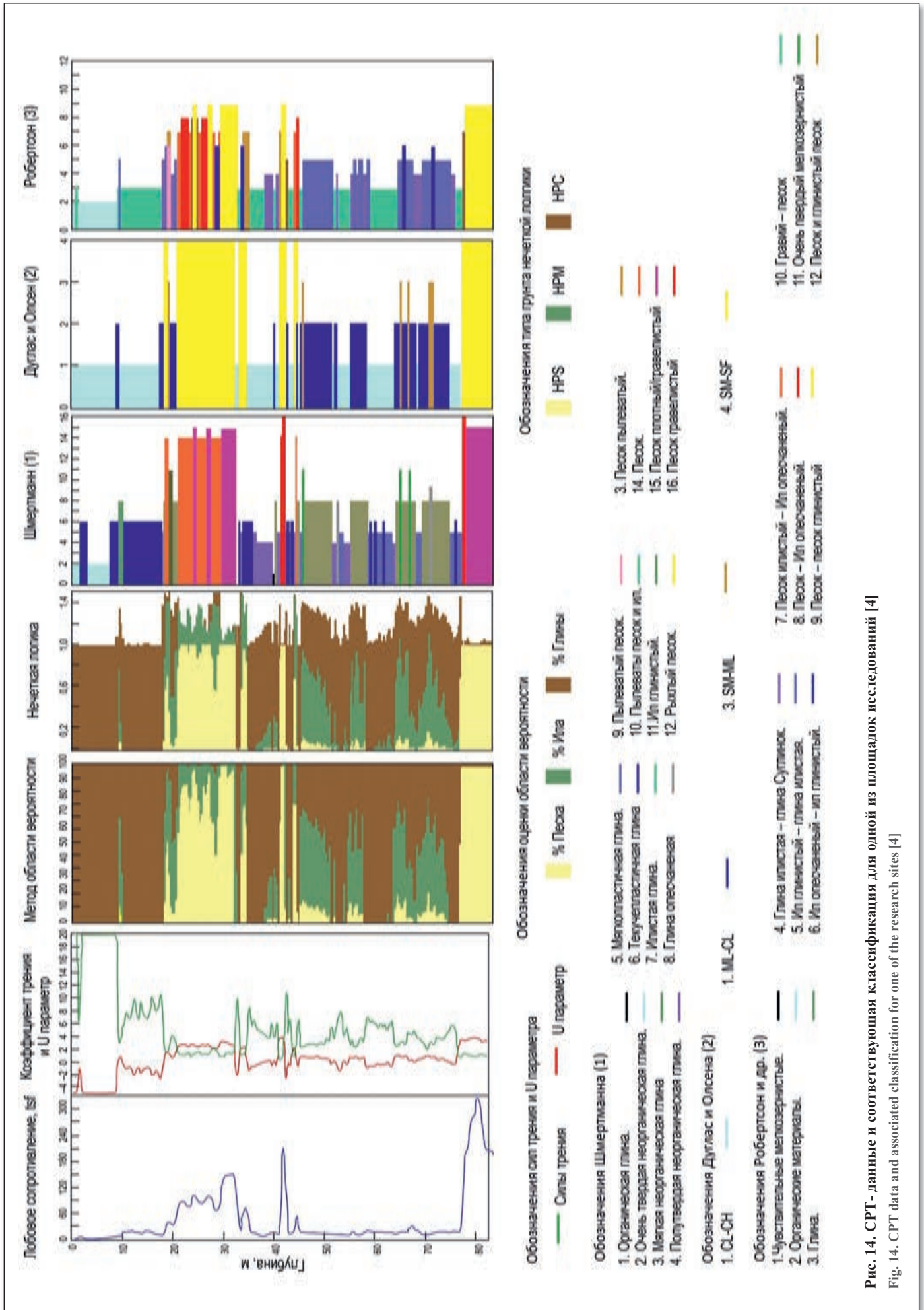
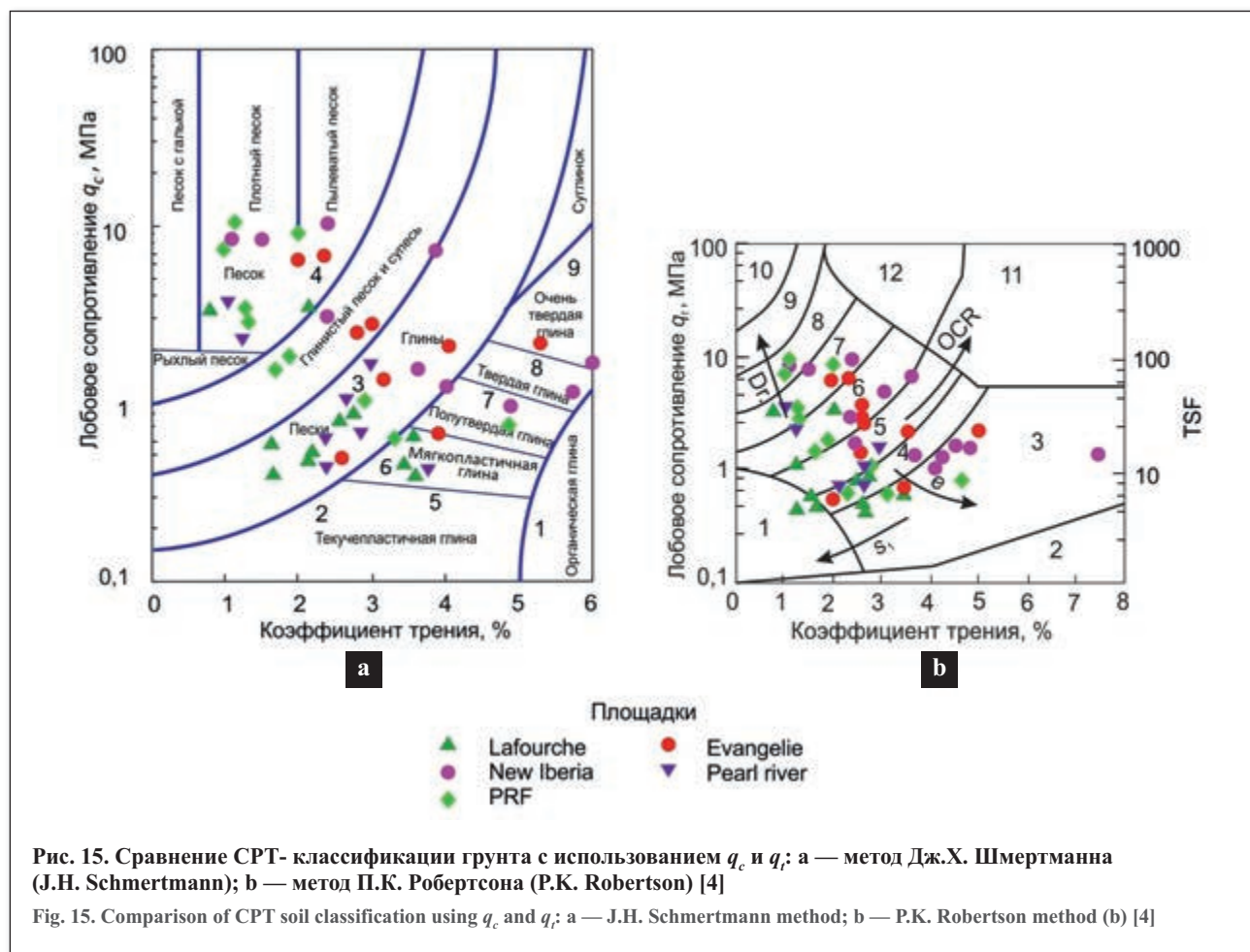


Рис. 14. СРТ- данные и соответствующая классификация для одной из площадок исследований [4]

Fig. 14. CPT data and associated classification for one of the research sites [4]



СРТ-классификации на основе ГОСТ 25100-2011

Классификация грунтов по их генезису и наименованию выполняется в РФ с использованием свойств грунтов в соответствии с требованиями ГОСТ 25100-2011. Как правило, практически все характеристики грунтов для целей классификации определяются путем испытаний образцов в лабораторных условиях. Таким образом, для того чтобы классифицировать грунты, следует отобрать монолиты, затем подготовить образцы и провести лабораторные испытания. Подобная процедура существенным образом увеличивает продолжительность инженерно-геологических изысканий, но в то же время является общепринятой в отечественной и зарубежной практике. К сожалению, несмотря на показанные выше достоинства СРТ-классификации, признанные во всех зарубежных странах, этот метод не нашел практического применения в России.

Известно, что ГОСТ 25100-2011 дисперсные грунты с механическими структурными связями выделяет в подкласс несвязных (сыпучих) грунтов, а грунты с физическими и физико-химическими структурными связями — в подкласс связных грунтов.

К сыпучим грунтам относят грунты, состоящие из элементов/частиц размером от 0,05 мм до более 800 мм (ГОСТ 25100-2011). Для классификации сыпучих грунтов используются следующие характеристики: размер частиц, коэффициент водонасыщения, коэффициент пористости, степень плотности и др. При последующем определении механических свойств основными являются коэффициент пористости или степень плотности.

Глинистые грунты классифицируются с использованием числа пластичности с разделением на супеси, су-

глинки и глины (табл. Б.16, Б.17 ГОСТ 25100-2011) и показателя текучести с разделением по физическому состоянию от текучих до твердых (табл. Б.2.12 ГОСТ 25100-2011).

Таким образом, при разработке СРТ-диаграмм на основе классификации ГОСТ 25100-2011 следует использовать следующие характеристики грунтов:

- сыпучие грунты: коэффициент водонасыщения, коэффициент пористости, степень плотности;
- связные грунты: число пластичности и показатель текучести.

Все перечисленные характеристики дисперсных грунтов определяются из лабораторных испытаний грунтов и приводятся в отчетах по результатам проведения инженерно-геологических изысканий. Практически во всех подобных отчетах имеются также данные статического зондирования, поэтому не представляет большой сложности найти соответствующие корреляционные связи между зарубежной СРТ-классификацией и классификацией по ГОСТ 25100-2011.

Следует отметить, что методы механических испытаний с целью определения деформационных и прочностных свойств грунтов зависят от вида грунта и его природных свойств. Например, испытания водонасыщенных сыпучих и связных грунтов с целью определения их деформационных и прочностных свойств рекомендуется проводить в условиях недренажно-неконсолированного или консолидированно-недренированного сдвига, а маловлажных грунтов — по схеме консолидированно-дренированного сдвига. Другим примером являются механические испытания набухающих и просадочных

Классификация типа поведения грунта
Classification of the type soil behavior

Номер типа грунта	Оригинальное наименование	Предлагаемый российский аналог классификации	Условия классификации по I_c
1	Sensitive fine grained	Чувствительный тонкодисперсный грунт	–
2	Organic soil to clay	Органический и органоминеральный грунт	больше 3,60
3	Clay	Глина	от 2,95 до 3,60
4	Silt mixture	Суглинок	от 2,60 до 2,95
5	Sand mixture	Супесь	от 2,05 до 2,60
6	Sand	Песок	от 1,31 до 2,05
7	Dense sand to gravelly sand	Плотный песок–гравелистый песок	меньше 1,31
8	Very dense, stiff soil	Очень плотный, жесткий грунт	–
9	Very stiff, fine-grained soil	Очень твердый, тонкодисперсный грунт	–

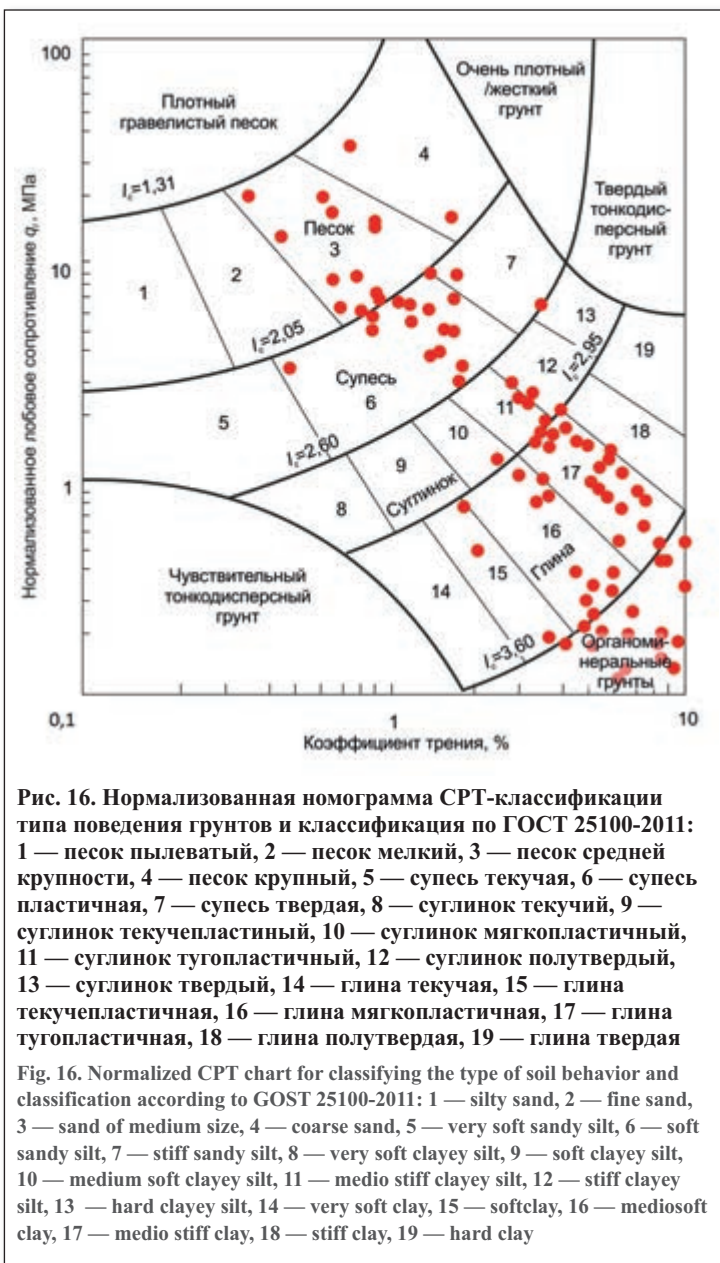


Рис. 16. Нормализованная номограмма СРТ-классификации типа поведения грунтов и классификация по ГОСТ 25100-2011: 1 — песок пылеватый, 2 — песок мелкий, 3 — песок средней крупности, 4 — песок крупный, 5 — супесь текучая, 6 — супесь пластичная, 7 — супесь твердая, 8 — суглинок текучий, 9 — суглинок текучепластичный, 10 — суглинок мягкопластичный, 11 — суглинок тугопластичный, 12 — суглинок полутвердый, 13 — суглинок твердый, 14 — глина текучая, 15 — глина текучепластичная, 16 — глина мягкопластичная, 17 — глина тугопластичная, 18 — глина полутвердая, 19 — глина твердая

Fig. 16. Normalized CPT chart for classifying the type of soil behavior and classification according to GOST 25100-2011: 1 — silty sand, 2 — fine sand, 3 — sand of medium size, 4 — coarse sand, 5 — very soft sandy silt, 6 — soft sandy silt, 7 — stiff sandy silt, 8 — very soft clayey silt, 9 — soft clayey silt, 10 — medium soft clayey silt, 11 — medio stiff clayey silt, 12 — stiff clayey silt, 13 — hard clayey silt, 14 — very soft clay, 15 — soft clay, 16 — mediosoft clay, 17 — medio stiff clay, 18 — stiff clay, 19 — hard clay

грунтов, которые проводятся совершенно другими методами, чем у песков и глин. Все это говорит о том, что, не зная вид грунта, невозможно выбрать соответствующий

метод испытаний. Таким образом, определяющим при проведении исследований свойств грунтов является их классификация через характеристики грунтов, а затем уже определение их механических свойств.

В зарубежной практике СРТ-классификации грунтов наиболее часто используются оба метода П.К. Робертсона (P.K. Robertson) [16, 19]. Метод 1990 г. был разработан для классификации современных, нецементированных, нечувствительных нормально консолидированных грунтов. Метод учитывает общие особенности формирования грунтов, такие как возрастание плотности, возраст и цементацию для песчаных грунтов, историю напряжений (*OCR*) и чувствительность для связных грунтов.

Часто важно понимать, что методы СРТ-классификации являются обобщенными глобальными и могут служить руководством для оценки типа поведения грунта, а не стандартной классификации ГОСТ 25100-2011 и ASTM D2487. Не следует ожидать, что рассмотренные выше методы обеспечат точный прогноз типа грунта для всех грунтовых условий. Однако в конкретных геологических условиях известные методы могут быть скорректированы с учетом местного опыта, что позволит разработать хорошие местные корреляции. Подобный пример приведен ниже.

Пример классификации грунтов по данным статического зондирования

Классификация грунтов по данным статического зондирования была выполнена, используя данные из нескольких отчетов по результатам проведения инженерно-геологических изысканий в г. Набережные Челны. В отчетах приведены наименования типа грунтов, определенные по стандартной классификации ГОСТ 25100-2011 через свойства грунтов.

СРТ-классификация была выполнена методом П.К. Робертсона (P.K. Robertson) [19], используя данные зондирования электрическим зондом в программе Geotek Field [1, 2].

На основе данных статического зондирования для каждого типа грунтов был определен индекс материала (*I*). На рис. 16 показаны 9 зон, где шесть и выше имеют тенденцию быть песчаными, а пять и ниже имеют тенденцию быть глинистыми. В зоне песка с ростом плотности увеличивается q_i и может уменьшаться R_f . Для глинистых грунтов увеличение показателя влажности на границе те-

Сравнение определения вида грунта по ГОСТ 25100-2011 и П.К. Робертсону (P.K. Robertson) [16]
Comparison of soil type determination according to GOST 25100-2011 and P.K. Robertson [16]

Вид грунта по ГОСТ 25100-2011	I_c — среднее, по данным зондирования	I_c — по табл. 6 и типу поведения грунта
Песок пылеватый, средней плотности	1,99	(1,31–2,05) песок
Песок мелкий, средней плотности, малой степени водонасыщенности	2,31	(2,05–2,60) супесь–пылеватый песок
Супесь	2,70	(2,60–2,95) суглинок
Суглинок	3,36	(2,95–3,60) глина

кучести приводит к уменьшению как q_p , так и R_f . Таким образом, чувствительные грунты (высокие значения S_f) имеют тенденцию к очень низким коэффициентам трения, что отражено в зоне 1. Органические грунты, такие как торф, демонстрируют очень высокие значения R_f и очень низкие значения q_p , что учтено ведением зоны 2. Увеличение сжимаемости (увеличение коэффициента пористости) приводит к уменьшению лобового сопротивления с увеличением коэффициента трения. Таким образом, карбонатные пески или пески с высоким содержанием слюды имеют тенденцию к высокому коэффициенту трения и могут попасть в область опесчаненных глин.


Данные статического зондирования были обработаны и нанесены на нормализованную номограмму П.К. Робертсона (P.K. Robertson), которая была видоизменена в соответствии с отечественной классификацией (табл. 5).

В табл. 6 приведено сравнение вида грунтов, классифицированных по ГОСТ 25100-2011 и данных статического зондирования на рассматриваемой площадке исследований. Как видно из табл. 6, несмотря на достаточную условность СРТ-метода для определения типа поведения грунта, вид грунта, установленный по ГОСТ 25100-2011, близок к СРТ-классификации. Следует иметь в виду, что П.К. Робертсоном (P.K. Robertson) был предложен метод для классификации не вида грунта, а определения типа поведения грунта с разделением их на две основные группы механического поведения — сыпучие и связные. С этой точки зрения песок и пылеватый песок относятся к сыпучим грунтам, а супесь и суглинок — к связным. В то же время, из рис. 16 видно, что глинистые грунты переходят в органоминеральные, если индекс материала более 3,6. С точки зрения авторов зона 2 на номограмме классифицируется не только как органоминеральные грунты, но и как мягкопластичные и текучепластичные глинистые грунты.

В связи с тем, что классификация связных грунтов по ГОСТ 25100-2011 определяется числом пластичности и показателем текучести, предлагается SBTn зоны разделить на сектора (см. рис. 16), которые образованы прямыми, исходящими из левого верхнего угла нормализованной диаграммы П.К. Робертсона (P.K. Robertson) под углом, который вычисляется как отношение коэффициента трения к нормализованному лобовому сопротивлению. Каждый сектор соответствует определенному диапазону значений показателей для песчаных и глинистых грунтов, которые приведены в таблицах Б.12 и Б.19 ГОСТ 25100-2011. Следует отметить, что границы секторов на рис. 16 проведены условно, и могут быть уточнены путем сопоставительных исследований.

Обобщение и заключение

Методы СРТ-классификации, предложенные различными авторами, определяют тип грунта, используя лобовое сопротивление зонда, поровое давление и коэффициент трения как входные параметры. Общей чертой рассмотренных методов является их хорошее совпадение со стандартной классификацией, выполняемой путем испытаний образцов грунта. В отличие от стандартной СРТ-классификации, вероятностный подход более предпочтителен при непрерывной классификации грунтов по разрезу, так как включает вероятностную информацию о составе грунтов.

С целью практического применения СРТ-методов классификации в РФ при проведении инженерно-геологических исследований целесообразно выполнить сравнительный анализ, используя данные инженерно-геологических изысканий, и разработать рекомендации по их внедрению. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев Г.Г., 2017. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования. ООО «Прондо», Москва.
2. Болдырев Г.Г., Барвахов В.А., Шейнин В.И., Каширский В.И., Идрисов И.Х., Дивеев А.А., 2019. Информационные системы в геотехнике – 3D-Геотехника. Геотехника, Том XI, № 2, с. 6–27, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2019-11-2-6-27>.
3. Рыжков И.Б., Исаев О.Н., 2010. Статическое зондирование грунтов. АСВ, Москва.
4. Abu-Farsakh M.Y., Zhang Z., Tumay M., Morvant M., 2008. Computerized cone penetration test for soil classification: development of MS-Windows software. Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2053, Issue 1, pp. 47–64, <https://doi.org/10.3141/2053-07>.
5. Begemann H.K.S., 1965. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, 1965, Vol. 1, pp. 17–20.

6. Bhattacharya B., Solomatine D.P., 2006. Machine learning in soil classification. *Neural Networks*, Vol. 19, Issue 2, pp. 186–195, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.005>.
7. Douglas B.J., Olsen R.S., 1981. Soil classification using electric cone penetrometer. *Proceedings of the Conference on Cone Penetration Testing and Experience*, Saint Louis, USA, 1981, pp. 209–227.
8. Eslami A., Fellenius B.H., 1997. Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, No. 6, pp. 886–904, <https://doi.org/10.1139/t97-056>.
9. Fellenius B.H., Eslami A., 2000. Soil profile interpreted from CPTu data. *Year 2000 Geotechnics, Proceedings of the Geotechnical Engineering Conference*, Bangkok, Thailand, 2000, pp. 27–30.
10. Ghaderi A., Shahri A.A., Larsson S., 2019. An artificial neural network based model to predict spatial soil type distribution using piezocone penetration test data (CPTu). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, No. 6, pp. 4579–4588, <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1400-9>.
11. Jefferies M.G., Davies M.P., 1991. Soil classification by the cone penetration test: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 173–176, <https://doi.org/10.1139/t91-023>.
12. Kurup P.U., Griffin E.P., 2006. Prediction of soil composition from CPT data using general regression neural network. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 281–289, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2006\)20:4\(281\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:4(281)).
13. Olanloye D.O., 2014. An intelligent system for soil classification using unsupervised learning approach. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 105, No. 11, pp. 21–27.
14. Olsen R.S., Mitchell J.K., 1995. CPT stress normalization and prediction of soil classification. *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing*, Linköping, Sweden, 1995, Vol. 2, pp. 257–262.
15. Ramsey N., 2002. A calibrated model for the interpretation of cone penetration tests (CPTs) in North Sea Quaternary soils. *Offshore Site Investigation and Geotechnics "Diversity and Sustainability"*, Proceedings of the International Conference, London, UK, 2002, pp. 341–356.
16. Robertson P.K., 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 151–158, <https://doi.org/10.1139/t90-014>.
17. Robertson P.K., 2009. Interpretation of cone penetration tests — a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 11, pp. 1337–1355, <https://doi.org/10.1139/T09-065>.
18. Robertson P.K., 2016. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, No. 12, pp. 1910–1927, <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>.
19. Robertson P.K., Campanella R.G., Gillespie D., Greig J., 1986. Use of piezometer cone data. *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Proceedings of the "In SITU'86" Specialty Conference*, Blacksburg, Virginia, USA, 1986, pp. 1263–1280.
20. Sanglerat G., Nhiem T.V., Sejourne M., Andina R., 1974. Direct soil classification by static penetrometers with special friction sleeve. *ESOPT-I, Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing*, Stockholm, Sweden, Vol. 2.2, pp. 337–344.
21. Schneider J.A., Hotstream J.N., Mayne P.W., Randolph M.F., 2012. Comparing CPTU Q-F and $Q-\Delta u_2/\sigma'_0$ soil classification charts. *Géotechnique Letters*, Vol. 2, Issue 4, pp. 209–215, <https://doi.org/10.1680/geolett.12.00044>.
22. Schneider J.A., Randolph M.F., Mayne P.W., Ramsey N.R., 2008. Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, Issue 11, pp. 1569–1586, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:11\(1569\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:11(1569)).
23. Tonni L., Simonini P., 2013. Shear wave velocity as function of cone penetration test measurements in sand and silt mixtures. *Engineering Geology*, Vol. 163, pp. 55–67, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.005>.
24. Tumay M.T., Abu-Farsakh M.Y., Zhang Z., 2008. From theory to implementation of a CPT-based probabilistic and fuzzy soil classification. *From Research to Practice in Geotechnical Engineering*, pp. 259–276, [https://doi.org/10.1061/40962\(325\)5](https://doi.org/10.1061/40962(325)5).
25. Vos J.D., 1982. The practical use of CPT in soil profiling. *ESOPT-II, Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, Netherlands, 1982, pp. 933–939.
26. Zhang Z., Tumay M.T., 1999. Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, Issue 3, pp. 179–186, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:3\(179\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:3(179)).

REFERENCES

1. Boldyrev G.G., 2017. Manual for static and dynamic soil testing data interpretation for geotechnical design. "Prondo" LLC, Moscow. (in Russian)
2. Boldyrev G.G., Barvashov V.A., Sheynin V.I., Kashirsky V.I., Idrisov I.Kh., Diveev A.A., 2019. Information systems in geotechnical engineering — 3D-geotechnics. *Geotechnics*, Vol. XI, No. 2, pp. 6–27, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2019-11-2-6-27>. (in Russian)
3. Ryzhkov I.B., Isaev O.N., 2010. Cone penetration testing of soils. ASV, Moscow. (in Russian)
4. Abu-Farsakh M.Y., Zhang Z., Tumay M., Morvant M., 2008. Computerized cone penetration test for soil classification: development of MS-Windows software. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2053, Issue 1, pp. 47–64, <https://doi.org/10.3141/2053-07>.
5. Begemann H.K.S., 1965. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canada, 1965, Vol. 1, pp. 17–20.

6. Bhattacharya B., Solomatine D.P., 2006. Machine learning in soil classification. *Neural Networks*, Vol. 19, Issue 2, pp. 186–195, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.005>.
7. Douglas B.J., Olsen R.S., 1981. Soil classification using electric cone penetrometer. *Proceedings of the Conference on Cone Penetration Testing and Experience*, Saint Louis, USA, 1981, pp. 209–227.
8. Eslami A., Fellenius B.H., 1997. Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, No. 6, pp. 886–904, <https://doi.org/10.1139/t97-056>.
9. Fellenius B.H., Eslami A., 2000. Soil profile interpreted from CPTu data. *Year 2000 Geotechnics, Proceedings of the Geotechnical Engineering Conference*, Bangkok, Thailand, 2000, pp. 27–30.
10. Ghaderi A., Shahri A.A., Larsson S., 2019. An artificial neural network based model to predict spatial soil type distribution using piezocone penetration test data (CPTu). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, No. 6, pp. 4579–4588, <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1400-9>.
11. Jefferies M.G., Davies M.P., 1991. Soil classification by the cone penetration test: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 173–176, <https://doi.org/10.1139/t91-023>.
12. Kurup P.U., Griffin E.P., 2006. Prediction of soil composition from CPT data using general regression neural network. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 281–289, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2006\)20:4\(281\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:4(281)).
13. Olanloye D.O., 2014. An intelligent system for soil classification using unsupervised learning approach. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 105, No. 11, pp. 21–27.
14. Olsen R.S., Mitchell J.K., 1995. CPT stress normalization and prediction of soil classification. *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing*, Linköping, Sweden, 1995, Vol. 2, pp. 257–262.
15. Ramsey N., 2002. A calibrated model for the interpretation of cone penetration tests (CPTs) in North Sea Quaternary soils. *Offshore Site Investigation and Geotechnics “Diversity and Sustainability”*, Proceedings of the International Conference, London, UK, 2002, pp. 341–356.
16. Robertson P.K., 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 151–158, <https://doi.org/10.1139/t90-014>.
17. Robertson P.K., 2009. Interpretation of cone penetration tests - a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 11, pp. 1337–1355, <https://doi.org/10.1139/T09-065>.
18. Robertson P.K., 2016. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, No. 12, pp. 1910–1927, <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>.
19. Robertson P.K., Campanella R.G., Gillespie D., Greig J., 1986. Use of piezometer cone data. *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Proceedings of the “In SITU’86” Specialty Conference, Blacksburg, Virginia, USA, 1986, pp. 1263–1280.
20. Sanglerat G., Nhiem T.V., Sejourne M., Andina R., 1974. Direct soil classification by static penetrometers with special friction sleeve. *ESOPT-I, Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing*, Stockholm, Sweden, Vol. 2.2, pp. 337–344.
21. Schneider J.A., Hotstream J.N., Mayne P.W., Randolph M.F., 2012. Comparing CPTU Q-F and $Q-\Delta u_2/\sigma_{v0}'$ soil classification charts. *Géotechnique Letters*, Vol. 2, Issue 4, pp. 209–215, <https://doi.org/10.1680/geolett.12.00044>.
22. Schneider J.A., Randolph M.F., Mayne P.W., Ramsey N.R., 2008. Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, Issue 11, pp. 1569–1586, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:11\(1569\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:11(1569)).
23. Tonni L., Simonini P., 2013. Shear wave velocity as function of cone penetration test measurements in sand and silt mixtures. *Engineering Geology*, Vol. 163, pp. 55–67, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.005>.
24. Tumay M.T., Abu-Farsakh M.Y., Zhang Z., 2008. From theory to implementation of a CPT-based probabilistic and fuzzy soil classification. *From Research to Practice in Geotechnical Engineering*, pp. 259–276, [https://doi.org/10.1061/40962\(325\)5](https://doi.org/10.1061/40962(325)5).
25. Vos J.D., 1982. The practical use of CPT in soil profiling. *ESOPT-II, Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, Netherlands, 1982, pp. 933–939.
26. Zhang Z., Tumay M.T., 1999. Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, Issue 3, pp. 179–186, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:3\(179\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:3(179)).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЛДЫРЕВ ГЕННАДИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

Директор по научной работе и инновациям
ООО «НПП «Геотек»», д.т.н., профессор, г. Пенза, Россия

ИДРИСОВ ИЛЬЯ ХАМИТОВИЧ

Генеральный директор ООО «НПП «Геотек»», к.т.н.,
г. Пенза, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

GENNADII G. BOLDYREV

Director for research and innovation of the “Scientific Production Enterprise
“Geotek” LLC, DSc (Doctor of Science in Technics), professor, Penza, Russia

ILIJ KH. IDRISOV

General director of the “Scientific Production Enterprise “Geotek” LLC, PhD (Candidate
of Science in Technics), Penza, Russia