

## Классификация грунтов по данным статического зондирования

Во второй части статьи о результатах разработки в ООО НПП «Геотек» комплексной технологии инженерно-геологических изысканий и проектирования оснований, представлены материалы по классификации грунтов по данным статического зондирования.

Классификация грунтов по их происхождению и наименованию выполняется с использованием характеристик грунтов в соответствии с требованиями ГОСТ 25100. В соответствии с принятой классификацией грунты разделяются на классы природных скальных, дисперсных и мерзлых грунтов. Как правило, практически все характеристики грунтов для целей классификации определяются путем испытаний образцов грунта в лабораторных условиях.

Как было отмечено ранее, классификация грунтов через их характеристики, определяемые путем лабораторных испытаний грунтов, является сама по себе не сложной, но трудоемкой и длительной по времени. Поэтому более универсальной является классификация грунтов по данным статического и динамического зондирования, которую можно выполнить непосредственно в полевых условиях, не прибегая к лабораторным испытаниям. В зарубежной практике инженерно-геологических изысканий подобную классификацию называют классификацией типа поведения грунтов (SBT – Soil Behaviour Type), разделяя грунты на сыпучие и связные без детальной классификации по ГОСТ 25100 и ASTM D 2487 (ASTM D 2487-2000 Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes).

Напомним, что предлагаемая авторами комплексная технология объединяет в единый производственный процесс инженерно-геологические изыскания и проектирование оснований сооружений. Результатом является сокращение сроков изысканий вследствие применения методов зондирования грунтов с автоматизированным контролем процесса испытаний и интерпретации данных испытаний. При этом результатом инженерно-геологических исследований является не только информация о свойствах грунтов, но и оценка их влияния на поведение проектируемого здания или сооружения.

Автором запланирована серия публикаций по данной теме, содержание которых приведено в файле в конце первой статьи серии.

Геннадий Григорьевич Болдырев приглашает всех читателей «ГеоИнфо» к широкому обсуждению рассматриваемого вопроса.

Написать письмо Геннадию Григорьевичу можно либо по электронной почте, либо воспользовавшись специальной формой в конце статьи.

**Болдырев Геннадий Григорьевич**

Директор по научной работе и инновациям ООО НПП «Геотек», д.т.н., г. Пенза  
g-boldyrev@geotek.ru

**Идрисов Илья Хамитович**

Генеральный директор ООО НПП «Геотек», к.т.н., г. Пенза  
idrisov@npp-geotek.ru

Классификация грунтов по их происхождению и наименованию выполняется с использованием характеристик грунтов в соответствии с требованиями ГОСТ 25100. В соответствии с принятой классификацией грунты разделяются на классы природных скальных, дисперсных и мерзлых грунтов. Как правило, практически все характеристики грунтов для целей классификации определяются путем испытаний образцов грунта 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 является общепринятой в отечественной и зарубежной практике. В связи с этим, были предложены иные методы, основанные на полевых испытаниях грунтов. Одним из них является разделение класса дисперсных грунтов на сыпучие и связные грунты.

Рассмотрим, какие характеристики грунтов следует определять для целей классификации грунтов, и какие из них можно найти с использованием полевых испытаний.

Скальные грунты обладают естественными (природными) жесткими структурными связями (кристаллизационными и цементационными), характерными для монолитных грунтов, и подразделяются на два подкласса: скальных и полускальных. К подклассу скальных грунтов относятся грунты с прочными кристаллизационными и цементационными структурными связями, к подклассу полускальных грунтов – с ослабленными, преимущественно цементационными связями. Условная граница между скальными и полускальными грунтами принимается по прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии:  $R_c \geq 5$  МПа – скальные грунты,  $R_c < 5$  МПа – полускальные грунты. Разновидности скальных грунтов выделяются по количественным показателям их вещественного состава, строения, состояния и свойств в соответствии с Приложением Б.1, В.1 и Г ГОСТ 25100. Количественными показателями являются: предел прочности на одноосное сжатие; плотность скелета грунта; пористость; коэффициент выветрелости; коэффициент размягчаемости; степень растворимости; коэффициент фильтрации и др. Из отмеченных характеристик для классификации скальных грунтов и расчетов деформации и прочности оснований определяющим параметром является прочность грунта на одноосное сжатие.

Известно, что прочность на одноосное сжатие хорошо коррелируется с модулем упругости для многих материалов. Поэтому, определив прочность на сжатие, можно не только классифицировать скальные грунты, но и оценить их сжимаемость. Вопрос только в том, каким способом можно определить прочность на одноосное сжатие в полевых условиях. Наиболее привлекательным является применение для этой цели статического зондирования с определением лобового сопротивления и его корреляцией с модулем упругости и прочностью на одноосное сжатие.

Дисперсные грунты с механическими структурными связями выделяют 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 с размером от менее 0,002 мм до более 800 мм. Классификация сыпучих грунтов выполняется с использованием следующих характеристик: размер частиц; коэффициент водонасыщения; коэффициент пористости; степень плотности и др. Определяющими из них, с точки зрения последующего использования при определении механических свойств, являются коэффициент пористости или степень плотности.

Глинистые грунты классифицируются с использованием числа пластичности с разделением на супеси, суглинки и глины (табл. Б.16, Б.17) и показателя текучести с разделением по физическому состоянию от текучих до твердых (табл. Б.2.12).

К особому классу структурно неустойчивых грунтов относятся набухающие и просадочные грунты. Классификация выполняется с использованием относительных деформации набухания и деформации просадочности (табл. Б.20, Б.21).

Все перечисленные характеристики дисперсных грунтов определяются из лабораторных испытаний грунтов.

В тоже время методы испытаний с целью определения деформационных и прочностных свойств грунтов зависят от вида дисперсного грунта и его природных свойств. Например, испытания водонасыщенных сыпучих и связных грунтов с целью определения их деформационных и прочностных свойств рекомендуется проводить в условиях недренированно-неконсолидированного или консолидированно-недренированного сдвига, а маловлажных грунтов по семе консолидированно-дренированного сдвига. Другим примером являются механические испытания набухающих и просадочных грунтов, которые проводятся совершенно другими методами по сравнению с песками и глинами. Всё 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.

Как было отмечено ранее, классификация грунтов через их характеристики, определяемые путем лабораторных испытаний грунтов, является сама по себе не сложной, но трудоемкой и длительной по времени. Поэтому более универсальной является классификация грунтов по данным статического и динамического зондирования, которую можно выполнить непосредственно в полевых условиях, не прибегая к лабораторным испытаниям. В зарубежной практике инженерно-геологических изысканий подобную классификацию называют классификацией типа поведения грунтов (SBT – Soil Behaviour Type), разделяя грунты на сыпучие и связные без детальной классификации по ГОСТ 25100 и ASTM D 2487 (ASTM D 2487-2000 Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes).

### **Классификация типа поведения**

В середине 1980-х годов в университете Британской Колумбии была разработана одна из первых компьютеризированных номограмм под названием «Классификация типа поведения грунтов» – «Soil Behaviour Type Classification» или «SBT». То есть классификация основана на наблюдаемом поведении, а не на размере частиц грунта и других физических характеристик грунтов.

Классификация грунта выполняется с использованием номограммы, на которой тип поведения грунта определяется индексом материала:

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log q_t)^2 + (\log R_f + 1,22)^2} \quad , (7.1)$$

где  $q_t = q_c + u_2(1 - a)$ ;  $R_f = (f_s / q_c) \cdot 100\%$ . В случае применения зонда типа СРТ  $u_2$  не измеряется и  $q_t = q_c$ .

Индекс материала является радиусом окружности с центром в верхнем левом углу рисунка 1, на котором показаны 12 зон, где 7 и выше имеют тенденцию быть песчаными, а 5 и ниже

имеют тенденцию быть глинистыми. В зоне песка с ростом плотности увеличивается  $q_t$  и может уменьшаться  $R_f$ . Рост коэффициента переуплотнения (OCR) связан с увеличением лобового сопротивления и коэффициента трения  $R_f$ . Для мелкозернистых глинистых грунтов увеличение показателя влажности на границе текучести приводит к уменьшению как  $q_t$ , так и  $R_f$ . Таким образом, чувствительные грунты (высокие значения  $S_t$ ) 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  $q_t$ , и, следовательно, это учтено в зоне 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.

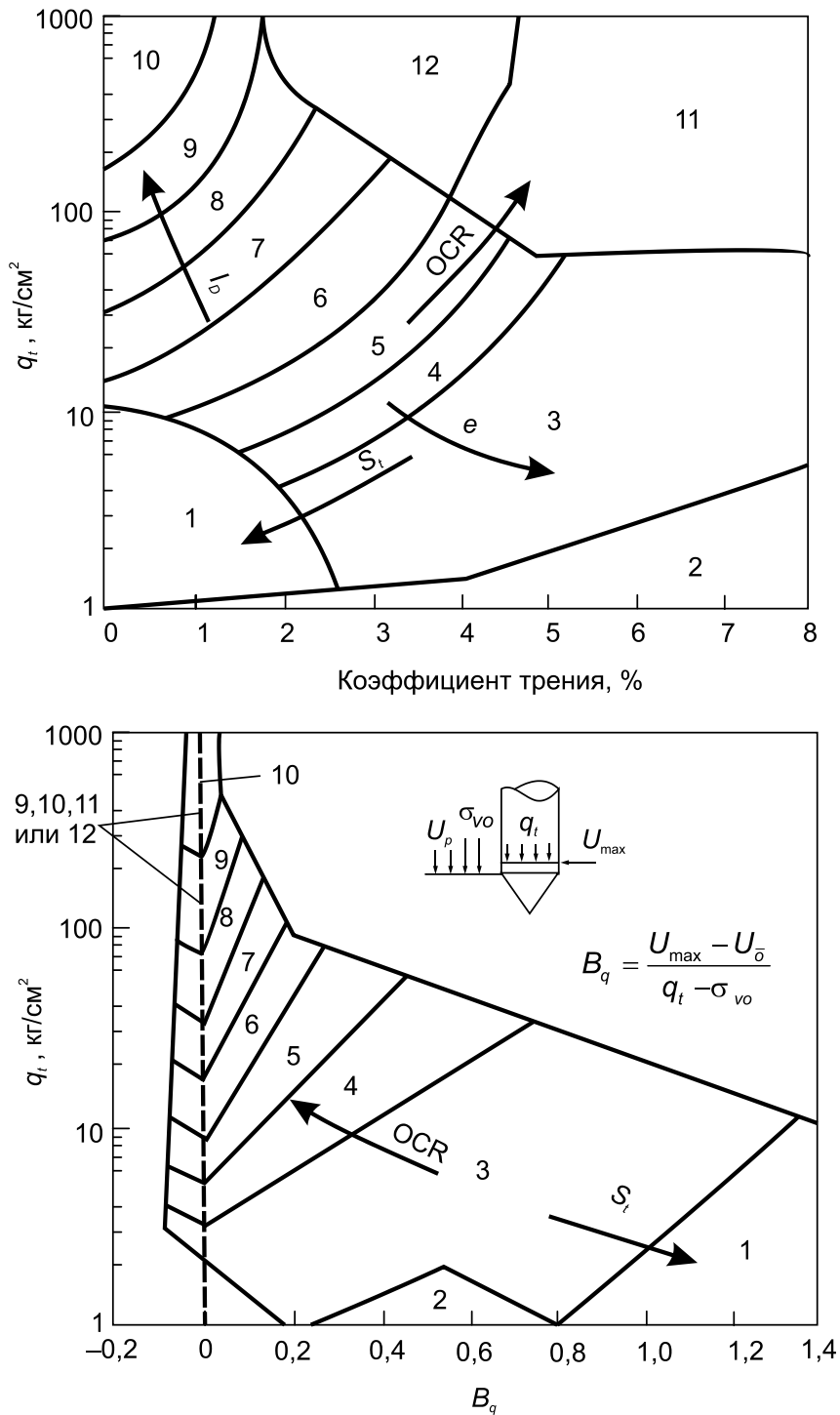
После того, как стали измерять поровое давление  $u_2$  стало очевидно, что для порового давления существует аналогичная классификация по типу грунта. Было предложено несколько классификационных номограмм, основанных на  $q_t$  и поровом давлении (Baligh et al. 1980, Jones & Rust 1982, Senneset & Janbu 1984). В номограмме Senneset & Janbu (1984) используется коэффициент порового давления,  $V_q$ :

$$V_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{vo}} \quad (7.2)$$

где  $\Delta u$  - избыточное поровое давление измеренное в основании конуса,  $u_2 - u_0$ ;  $q_t$  - лобовое сопротивление, скорректированное с учетом влияния порового давления;  $\sigma_{vo}$  - полное напряжение от собственного веса грунта.

Коррекция  $q_t$  обычно имеет значение только в мягких, мелкозернистых грунтах, где  $q_c$  может быть небольшим, а  $\Delta u$  может быть очень большим.

Отметим, что отрицательное поровое давление показано для всех 12 зон. Номограмма с  $V_q$  оказалась полезной для водонасыщенных грунтов и в качестве независимого параметра обычно согласуется с классификацией по  $R_f$ . Поэтому для определения типа поведения грунта рекомендуется использовать все три параметра зондирования ( $q_c$ ,  $u$ ,  $f_s$ ) в форме  $q_t$ ,  $V_q$  и  $R_f$ .



**Рис. 1.** Традиционная номограмма для классификации типа грунта (Robertson & Campanella, 1983a)

**Таблица 1.** Тип поведения грунта (Robertson, 1986)

Зона	Тип поведения грунта	$q_t / N$	$t_{50}$ (минут)
1	Чувствительные тонкодисперсные	2	10-500
2	Органические грунты	1	2-20
3	Глины	1	10-100
4	Пылеватые глинистые грунты	1,5	5-10
5	То же с большой долей пылеватых частиц	2	2-5
6	Пылеватые и опесчаненные супеси	2,5	1-2
7	Пылеватые пески и опесчаненные супеси	3	5-1
8	Пески, в том числе с примесью пылеватых частиц	4	0-5
9	Пески	5	дренированные
10	Гравелистые и крупнозернистые пески	6	дренированные
11	Очень плотные тонкодисперсные грунты*	1	неизвестно
12	Пески цементированные или переуплотненные*	2	неизвестно

Примечание: \*переуплотненные или цементированные; В связи с тем, что зарубежная классификация типа грунтов не совпадает с ГОСТ 25100, то наименование типа поведения грунта в данной таблице не позволяет ее использовать прямым образом;  $N$  – количество ударов при динамическом зондировании;  $t_{50}$  - время завершения 50% первичной консолидации

### Классификация нормализованного типа поведения

Проблема, связанная с существующими классификационными номограммами, состоит в том, что грунты могут постепенно меняться по своей очевидной классификации по мере погружения зонда. Это связано с тем, что лобовое сопротивление и силы трения имеют тенденцию к увеличению с ростом напряжений от собственного веса грунта. Например, в толстом слое нормально уплотненной глины лобовое сопротивление линейно увеличивается с глубиной, что приводит к очевидному изменению классификации СРТ. Существующие классификационные номограммы основаны преимущественно на данных, полученных из профилей СРТ, распространяющихся на глубину менее 30 м. Поэтому для данных СРТ, полученных на глубинах, значительно превышающих 30 м, можно ожидать некоторую ошибку при использовании стандартных классификационных номограмм для СРТУ, приведенные на рисунке 1.

Робертсон в 1990 году предложил классификационную таблицу типа поведения грунта, основанную на нормализованном лобовом сопротивлении и нормализованном коэффициенте трения для интеграции с номограммой  $B_q$  (рис. 2). Нормализация лобового сопротивления выполнена следующим образом:

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma_{v0}}, \quad (7.3)$$

где  $\sigma_{v0} = \sum z_i \gamma_i$ ;  $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$ , здесь  $u_0$  - гидростатическое давление в грунтовой воде;  $q_t = q_c + u_2(1 - a)$ . В случае применения зонда типа СРТ  $u_2$  не измеряется и  $q_t = q_c$ .

Нормализация порового давления выполняется по формуле:

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})} = \frac{\Delta u}{q_n}. \quad (7.4)$$

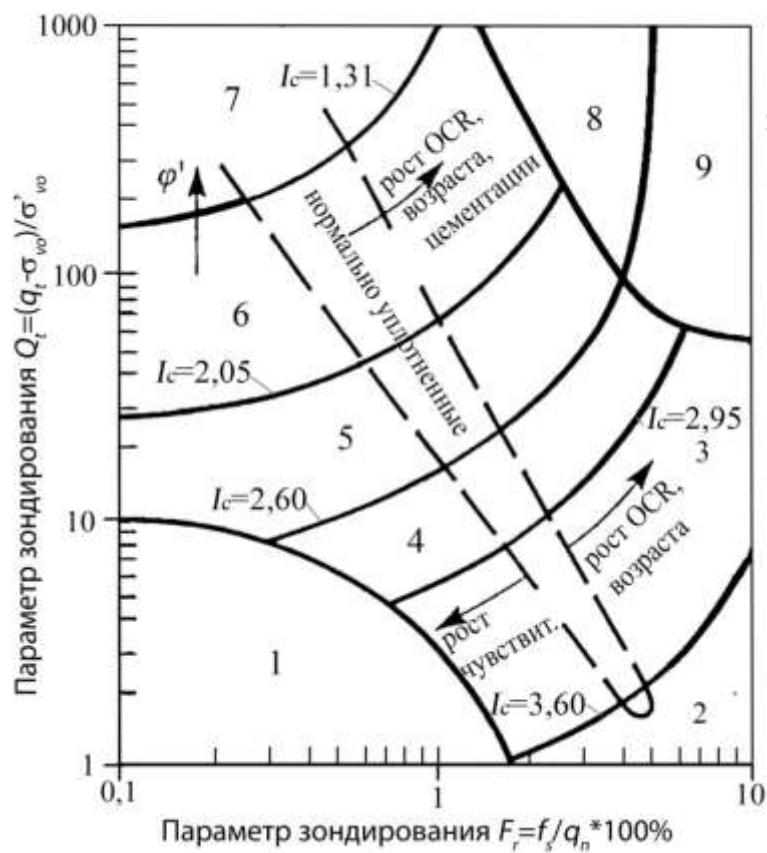
Кроме того, значения коэффициента трения должны быть нормализованы как:

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \times 100\% \quad (7.5)$$

Однако должно быть осознано, что не нормализованные значения коэффициента трения почти всегда численно эквивалентны (до значащих цифр) нормализованным значениям из-за того, что напряжение от собственного веса грунта обычно очень мало по сравнению с напряжением под вершиной конуса зонда. Это означает, что единственное существенное различие между графиками на рисунках 1 и 2 – нормализованное лобовое сопротивление,  $Q_t$ .

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \lg Q_t)^2 + (\lg F_r + 1,22)^2} \quad (7.6)$$

Как и для ненормализованного значения,  $F_r$  в уравнении 7.6 чаще всего указывается в процентах.



**Рис. 2.** SBTn номограмма для классификации типа грунта с использованием нормализованных параметров (Robertson, 1990)

**Таблица 2.** Классификация типа поведения грунта

Номер типа грунта	Оригинальное наименование	Приблизительный 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 – пылеватый песок	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	

Зоны, определенные на рисунке 2, отличаются от зон на рисунке 1. Нормализованные диаграммы показали свою эффективность для глубоких отложений, превышающих 30 м (Robertson, 1990).

В 2010 году Робертсон модернизировал номограмму, предложенную им в 1986 году (рис. 2) и предложил новую, которая показана на рисунке 3. Эта номограмма имеет меньшее количество зон и использует СРТ параметры: лобовое сопротивление ( $q_c$ ) и коэффициент трения ( $R_f$ ). Номограмма является глобальной по своей природе и может предсказывать тип поведения грунта при СРТ зондировании до 20 м. Как видно из рисунка 3, лобовое сопротивление нормализовано атмосферным давлением ( $p_a$ ), принимаемым равным 100 кПа.



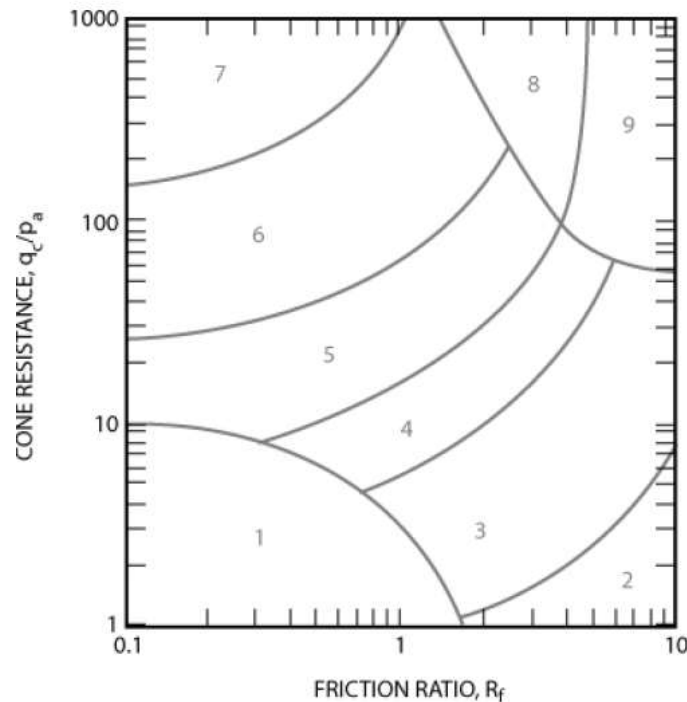


Рис. 3. Модернизированная SBT номограмма Робертсона (Robertson & Cabal 2010)

Таблица 3. SBT и SBTn зоны поведения грунта

SBT зоны Robertson (1986)	SBTn зоны Robertson (1990)		Тип поведения грунта
	SBTn зоны	I <sub>c</sub>	
1	1	-	Чувствительные тонкодисперсные
2	2	>3,6	Органические грунты
3	3	2,95-3,6	Глины
4, 5	4	2,60-2,95	Суглинки
6, 7	5	2,05-2,6	Супеси
8	6	1,31-2,05	Пылеватые пески
9, 10	7	<1,31	Плотные пески, гравелистые пески
12	8	-	Пески сцементированные или переуплотненные
11	9	-	Очень плотные тонкодисперсные грунты

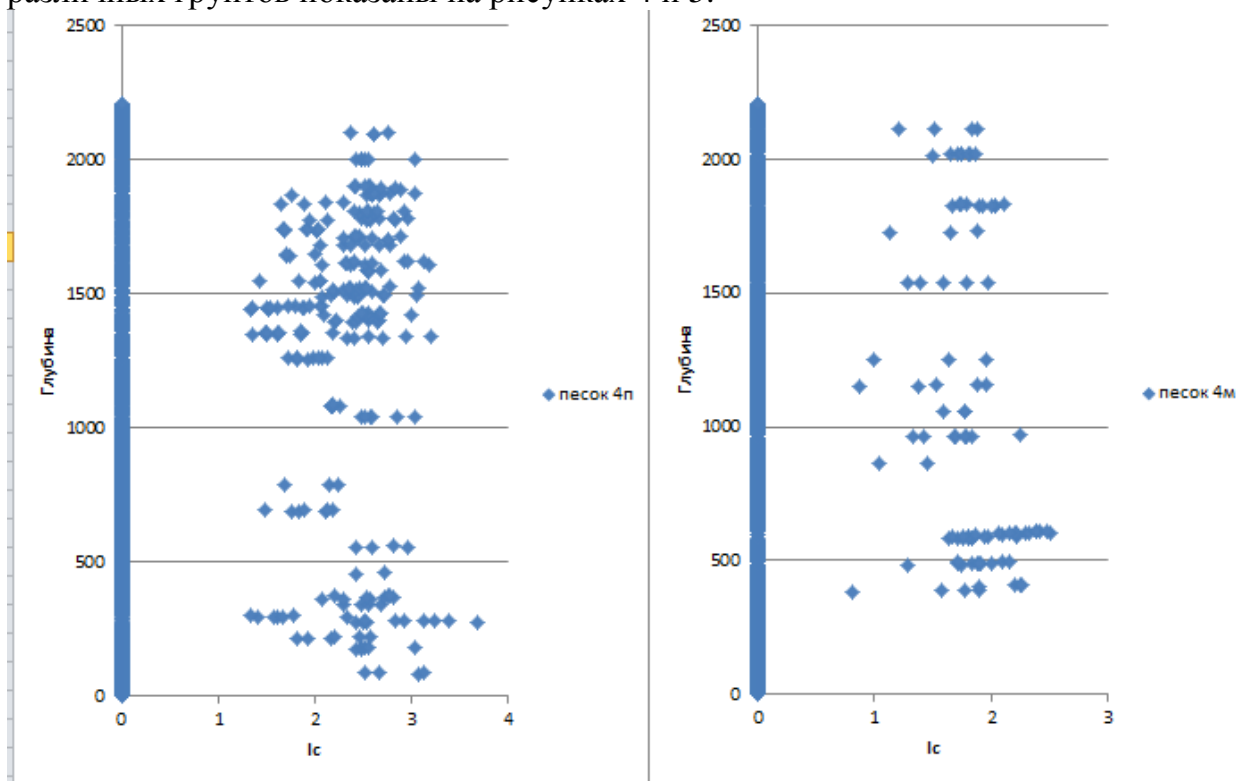
В зарубежной практике исследований грунтов используются обе номограммы Робертсона (рис. 1, рис. 2). Номограмма 1990 года была разработана для современных, нецементированных, нечувствительных, нормально консолидированных грунтов. Номограмма учитывает общие свойства отложений грунтов, такие как возрастание плотности, OCR, возраст и цементацию для песчаных грунтов и историю напряжений (OCR) и чувствительность ( $S_v$ ) для связных грунтов. Принято определять тип поведения грунта с использованием обеих номограмм.

Важно понимать, что классификационные номограммы являются обобщенными глобальными номограммами, которые являются руководством по оценке типа поведения грунта. Нельзя ожидать, что графики обеспечат точный прогноз типа грунта для всех грунтовых условий. Однако в конкретных геологических условиях номограммы могут быть скорректированы с учетом местного опыта, чтобы разработать хорошие местные корреляции. Подобный пример приведен ниже.

### Пример классификации грунтов по данным статического зондирования

Классификация грунтов по данным статического зондирования была выполнена с использованием данных из отчета по инженерно-геологическим изысканиям в городе Набережные Челны. В отчете приведены наименования видов грунтов, определенные по стандартной классификации ГОСТ 25100 через физические характеристики грунтов. Площадка исследований сложена у поверхности песками, подстилаемыми глинистыми грунтами.

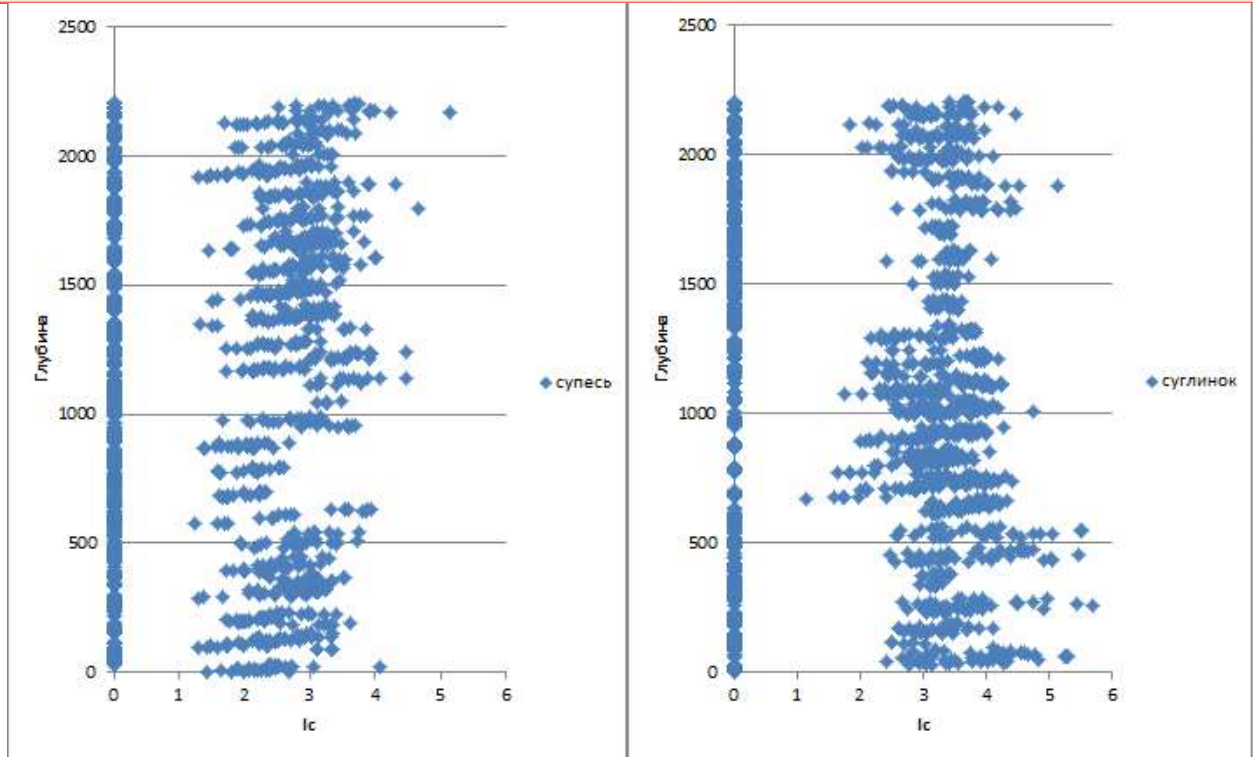
Данные статического зондирования были обработаны с использованием номограммы (рис. 1 и табл. 2) в программе Geotek Field. Полученные значения индекса материала для различных грунтов показаны на рисунках 4 и 5.



а)

б)

**Рис. 4.** Индекс материала для песка: а – песок мелкий, средней плотности, малой степени водонасыщенности; б – песок пылеватый, средней плотности



а)

б)

Рис. 5. Индекс материала для глинистых грунтов: а – супесь; б – суглинок

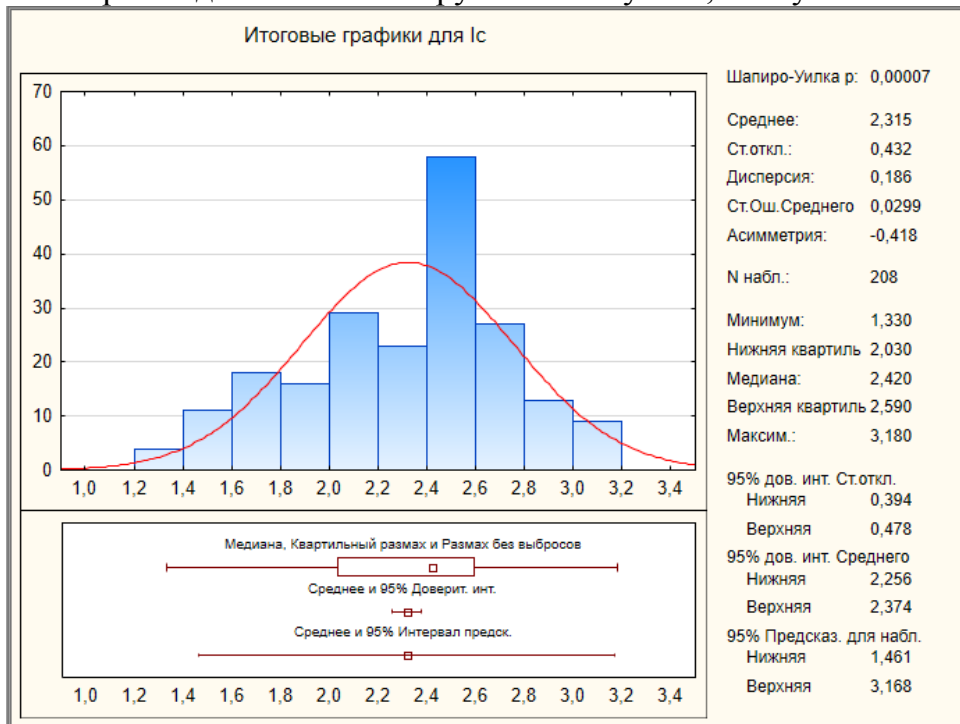


Рис. 6. Статистическая обработка индекса материала для песка мелкого, средней плотности, малой степени водонасыщенности в программе Statistica [2]

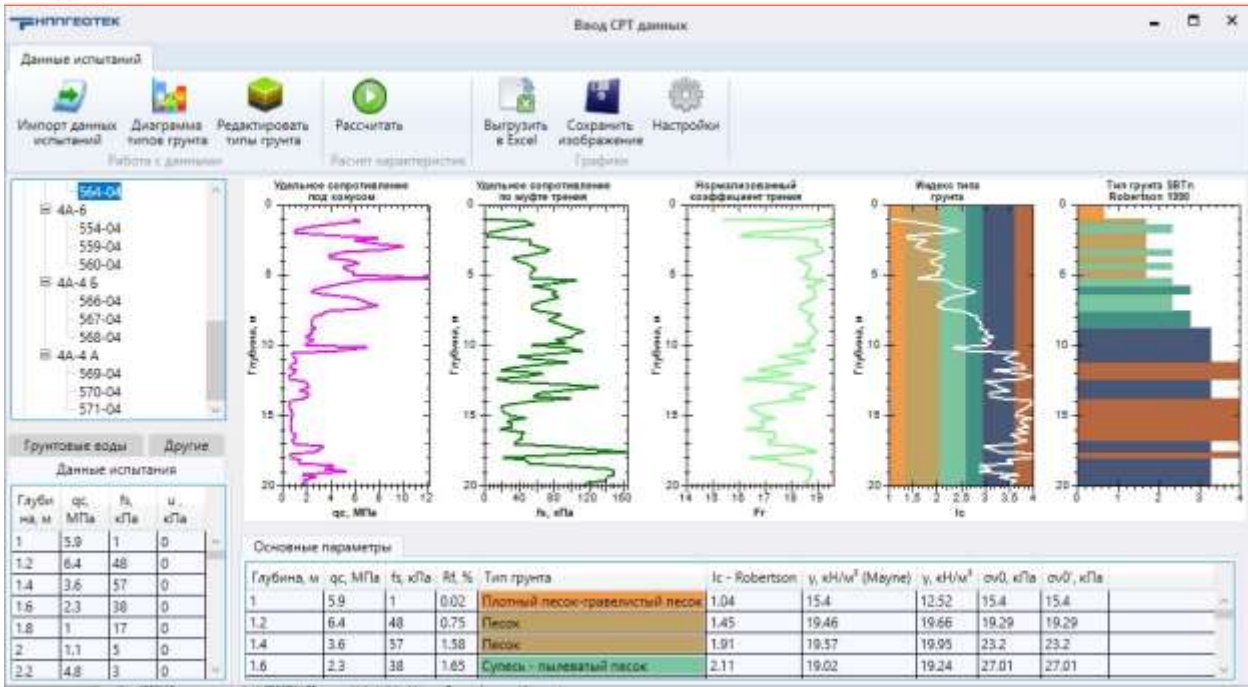


Рис. 7. Данные зондирования и тип поведения грунтов

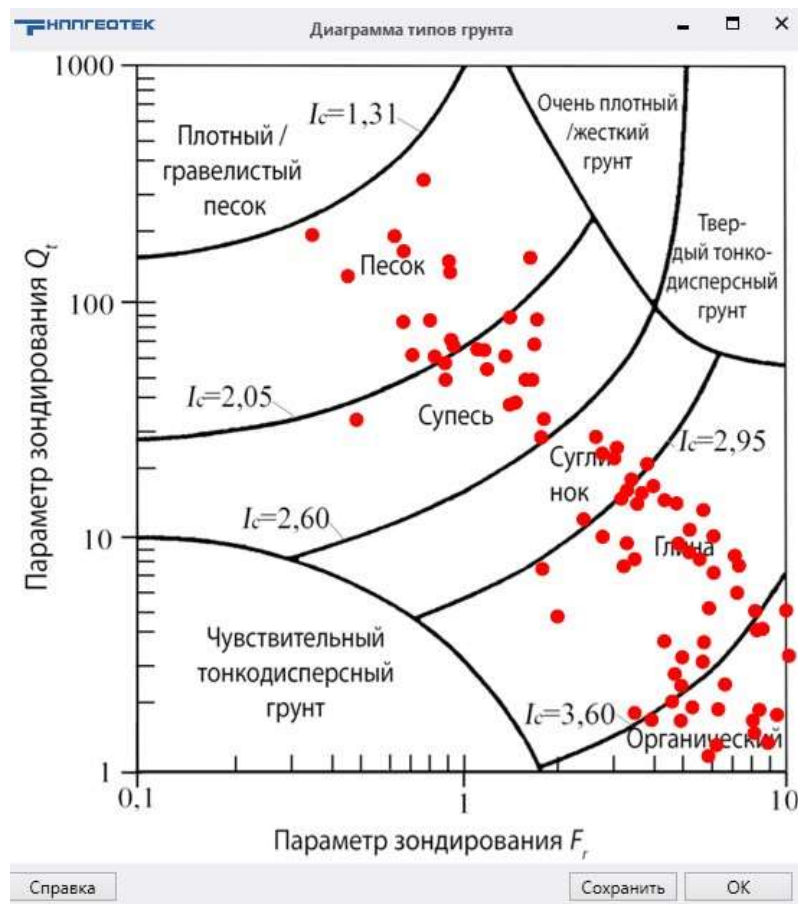


Рис. 8. Номограмма Робертона по одной из точек зондирования для площадки в г.Набережные Челны

Таблица 4. Сравнение определения вида грунта по ГОСТ 25100 и номограмме Робертсона

Вид грунта по ГОСТ 25100	Ис – среднее, по данным зондирования	Ис - по табл. 7.2 и тип 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

Несмотря на достаточную условность номограммы для определения типа поведения грунта, предложенной Робертсоном, вид грунта, определенный по ГОСТ 25100, близок к его классификации. Следует иметь ввиду, что номограмма была предложена Робертсоном для классификации не вида грунта, а определения типа поведения грунта, разделяя их на две основные группы механического поведения: сыпучие и связные грунты. С этой точки зрения песок и пылеватый песок – это сыпучие грунты, а супесь и суглинок относятся к связным грунтам. В то же время из рисунка 8 мы видим, что глинистые грунты переходят в органо-минеральные грунты, если индекс материала более 3,6. С нашей точки зрения зону 2 на номограмме рисунка 2 следует классифицировать не только как органо-минеральные грунты, но и как мягкопластичные и текучепластичные глинистые грунты.

Подразделение грунтов на два типа (сыпучие и связные) позволило в зарубежной практике получить большое количество корреляционных уравнений для определения физико-механических характеристик по данным зондирования. Подобные уравнения приведены в разделах 8 и 9 руководства, подготовленного ООО НПП «Геотек». Подробнее об этом читайте в следующих двух частях этой статьи.

### Список литературы

Библиографические данные цитированных выше авторов приведены в монографии «Болдырев Г.Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования. Изд-во, ООО Прондо, М., 2017, 476 с.».

### Дополнительная литература

1. Отчет по инженерно-геологическим изысканиям «Инженерно-геологического заключения по объекту: 4-А микрорайон в пос. ГЭС г. Набережные челны РТ», КамТИСИЗ.
2. STATIATICA. <https://statsoftstatistica.ru>