

## Оценка потенциала грунтов к разжижению



В последней, седьмой части статьи о результатах разработки в ООО НПП «Геотек» комплексной технологии инженерно-геологических изысканий и проектирования оснований, авторы рассказывают о таком явлении, как разжижение грунтов. Авторами показано несколько подходов для оценки потенциала грунтов к разжижению.

Анализ способности грунтов к разжижению может быть выполнен различными путями, с выбором соответствующего подхода в зависимости от конкретных характеристик каждого объекта и потенциальных последствий разжижения, которые вызывают наибольшую озабоченность.

Ключевой особенностью анализа способности грунтов к разжижению является рассмотрение геологических условий с точки зрения их однородности или неоднородности грунтов и того, как это может относиться к потенциальным последствиям разжижения (например, разжижение изолированных случайных карманов по сравнению с непрерывным слоем, который может вызвать значительную осадку или скольжение к свободной поверхности). Следует заметить, что некоторые моды деформации для данного сооружения могут зависеть больше от средних свойства конкретных слоев, тогда как другие моды деформации могут в большей степени зависеть от самых слабых зон в основании.

В завершении статьи авторы напоминают, что модуль «Оценка разжижаемости грунтов» входит в программу Geotek Field.

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.

Полный текст статьи с формулами и рисунками можно прочитать в формате pdf.

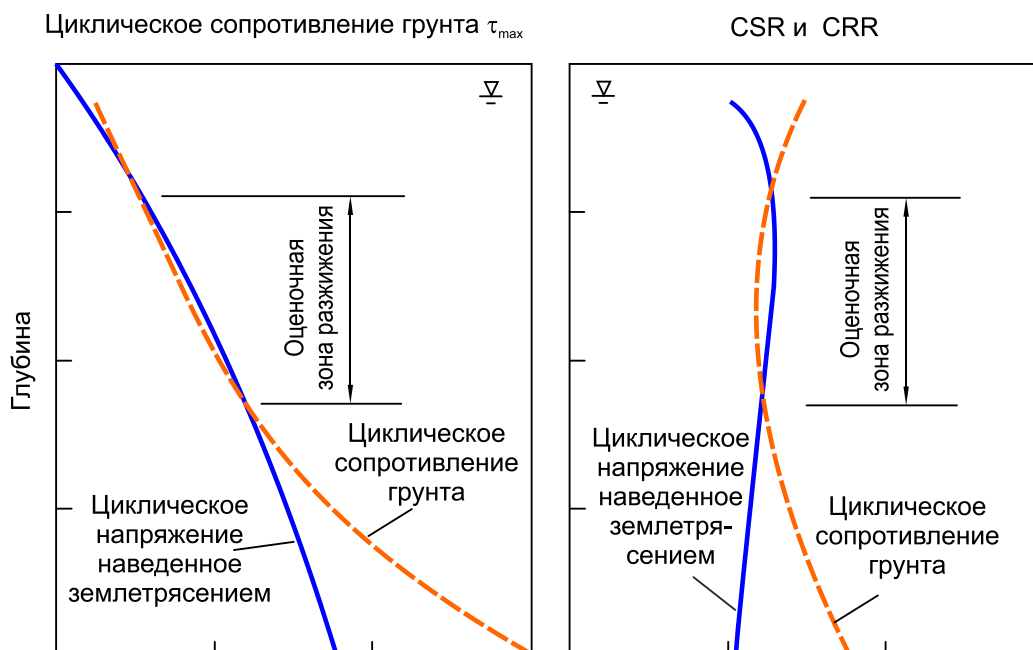
**Болдырев Геннадий Григорьевич**

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

**Идрисов Илья Хамитович**

Генеральный директор ООО НПП «Геотек», к.т.н., г. Пенза  
[idrisov@npp-geotek.ru](mailto:idrisov@npp-geotek.ru)

Явление разжижения заключается в полной или частичной потере грунтом несущей способности и переходе его в текучее состояние в результате разрушения структуры и смещения частиц относительно друг друга. Необходимыми условиями разжижения являются: разрушение структуры (часто при динамических воздействиях), возможность упрочнения грунта и полное насыщение его водой. Возможность разрушения структуры определяется интенсивностью воздействий, начальным напряженным состоянием и плотностью сложения грунта. Разжижение грунта может произойти во время землетрясения, потому что при прохождении сейсмической волны частицы грунта начинают колебаться с разными скоростями и часть контактов между ними разрывается. В результате грунт может стать водой с взвешенными в ней песчинками.



**Рис. 1.** Ожидаемые зоны разжижения, определенные сравнением наведенного землетрясением циклического напряжения с циклическим сопротивлением грунта (Idris & Boulanger 2008)

Было предложено несколько подходов или концепций для оценки потенциала грунтов к разжижению. Наиболее широко применяемым является подход, основанный на напряжениях, который сравнивает наведенные землетрясением циклические напряжения (CSR) с циклическим сопротивлением грунтов (CRR).

Наведенные горизонтальные циклические напряжения нормализуются вертикальным эффективным напряжением от собственного веса грунта ( $\sigma$ ), чтобы получить CSR, который затем сравнивается с CRR грунтов, как показано на рисунке 1. Разжижение ожидается на глубине, где наведенные напряжения превышают циклическое сопротивление.

### **Процедура оценки способности грунтов к разжижению**

Рекомендуемая процедура оценки способности грунтов к разжижению включает в себя три этапа:

- 1) Характеристика динамических эффектов землетрясения, т.е. сейсмические воздействия на грунт, оцениваемые коэффициентом циклических напряжений (CSR).
- 2) Характеристика сопротивления грунта действующему циклическому нагружению, оцениваемая коэффициентом циклического сопротивления (CRR).
- 3) Определение показателя безопасности от разжижения, то есть  $F.S. = CRR/CSR$ .

Количественная оценка способности к разжижения возможна из анализа свойств грунтов. В настоящее время используются два основных подхода для прогнозирования потенциала разжижения слоев грунтов:

(1) Оценки, основанные на сравнении напряжений, вызванных землетрясением и напряжениями, вызывающие разжижение, в циклических лабораторных испытаниях грунтов.

(2) Эмпирические методы, основанные на измерениях прочности грунтов в полевых условиях и наблюдениях за поведением массивов грунтов в предыдущих землетрясениях.

К сожалению, оценки разжижения, основанные на лабораторных испытаниях, ограничены способностью лабораторного оборудования воспроизводить начальное напряженное состояние в небольших образцах грунтов и нарушением природной структуры при отборе образцов. По этой причине эмпирические методы, основанные на полевых испытаниях пенетрацией, предпочтительны для инженерной оценки потенциала к разжижению.

### **Оценка устойчивости к разжижению**

Устойчивость к разжижению обычно оценивают с использованием коэффициента безопасности, который определяется как отношение между допускаемым сопротивлением разжижению, выраженным в терминах циклических напряжений, способных вызвать разжижение, к циклическому напряжению, возникающему в результате землетрясения. Оба этих напряжения обычно нормализуются относительно напряжений от собственного веса грунта. Они называются «коэффициент циклического сопротивления» (CRR) и «коэффициент циклического напряжения» (CSR).

$$FS = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot K_{\sigma} \cdot K_{\alpha}, (1)$$

где  $CRR_{7,5}$  - коэффициент циклического сопротивления для магнитуды величиной 7,5;  $K_{\sigma}$  - коэффициент, учитывающий напряжения от собственного веса грунта;  $K_{\alpha}$  - коэффициент, учитывающий наклон поверхности земли принимаемый равным 1,0 при наклоне поверхности менее 6 градусов.

Сид и Идрис (Seed & Idriss 1971, 1982) считают слои грунта с величиной  $FS$  между 1,25 и 1,5 безопасными, в то время как слои грунта с  $FS$  между 1,0 и 1,2 определены как разжижаемые. Реальное значение  $FS$  зависит структуры грунта и колебаний поверхности грунта. При расчете коэффициента безопасности эмпирические методы наиболее широко используются на практике.

Показатель циклического сопротивления ( $CRR$ ) характеризует сопротивление разжижению отложений, в то время как  $CSR$  является функцией колебаний при землетрясении и находится из лабораторных испытаний. Анализ полевых данных после землетрясений методами статического и динамического зондирования позволил обосновать переход от любой магнитуды к 7,5 путем корректировки к эквивалентному значению  $CSR_{7,5}$  следующим образом:

$$CSR_{7,5} = \frac{CSR}{MSF}. (2)$$

### Определение коэффициента циклического напряжения

Касательные напряжения, возникающие при сейсмическом воздействии, играют важную роль в развитии процесса разжижения. Интенсивность касательных напряжений во времени обычно очень неоднородна и их трудно применять в эмпирических методах. Seed (1983) предложил заменить нерегулярность во времени на эквивалентное число однородных циклов и ввел нормализацию касательных напряжений путем деления их на эффективное напряжение от собственного веса грунта. Это отношение стали называть коэффициентом циклических напряжений ( $CSR$ ). Сид и Идрис (Seed & Idriss, 1971) предложили определять  $CSR$  как:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot r_d, (3)$$

где:  $\tau_{av}$  - эквивалентное среднее касательное напряжение;  $\sigma_{vo}$  - полное напряжение от собственного веса грунта;  $\sigma'_{vo}$  - эффективное напряжение от собственного веса грунта;  $a_{max}$  - максимальное поверхностное ускорение в единицах  $g$ ;  $g$  - ускорение под действием силы тяжести;  $r_d$  - коэффициент уменьшения касательных напряжений с учетом изменчивости и глубины грунта.

Коэффициент уменьшения напряжений  $r_d$  имеет максимальное значение на поверхности земли и уменьшается с глубиной для учета распределительной способности грунтов. На семинаре NCEER рекомендовали определять  $r_d$  по Robertson & Wride (1998), а именно:

$$r_d = 1,0 - 0,00765z \text{ когда } z < 9,15 \text{ м}$$



$$r_d = 1,174 - 0,0267z \text{ когда } 9,15 \leq z < 23 \text{ м (4)}$$

$$r_d = 0,744 - 0,008z \text{ когда } 23 \leq z < 30 \text{ м}$$

$$r_d = 0,5 \text{ когда } z > 30 \text{ м}$$

где  $z$  – глубина (м) ниже поверхности грунта.

С целью улучшения оценки коэффициента уменьшения напряжений предложено выражение (Idriss, 1999; Idris & Boulanger, 2008):

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M_w], \quad (5)$$

где

$$\alpha(z) = -1,01 - 1,126 \cdot \sin[(z/11,73) + 5,133];$$

$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \cdot \sin[(z/11,28) + 5,142];$$

$z$  – глубина в м, менее или равна 15 м.

Результирующая зависимость для  $r_d$  показана на рисунке 2.

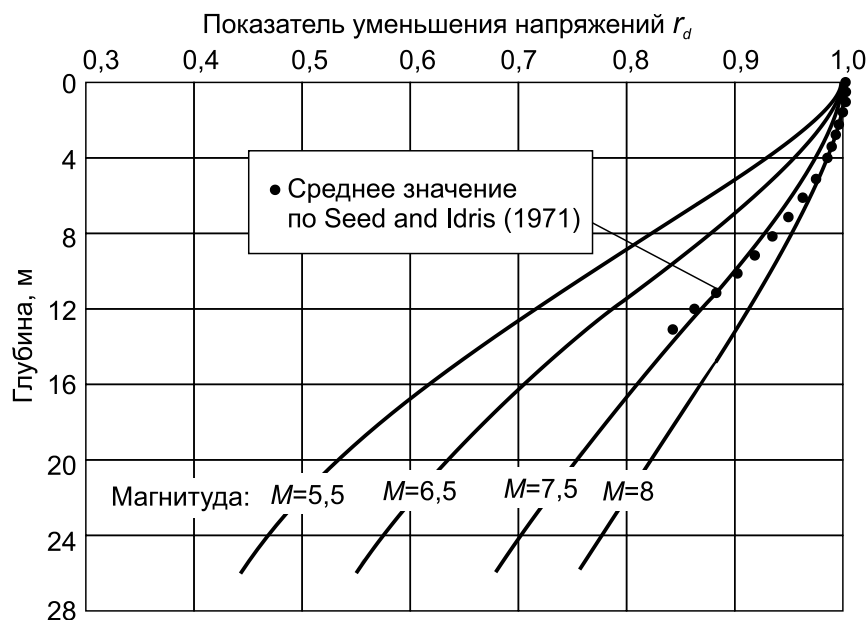


Рис. 2. Изменение  $r_d$  с глубиной и магнитудой

Процедура анализа, основанная на методе циклических напряжений, включает следующие шаги:

1. Определение  $a_{\max}$  и  $M_{7w}$  для расчетного землетрясения.
2. Построение профиля показателя циклических напряжений (CSR) с глубиной, используя уравнение (4) или (5).
3. Оценка параметров слоя критического сопротивления из SPT, CPT или  $V_s$  профилей.
4. Оценка содержания пылеватых частиц из лабораторных испытаний или полевых корреляций.
5. Определение показателя циклического сопротивления из номограмм или по упрощенным формулам, как функция параметров полевых испытаний и содержания пылеватых частиц.

б. Вычисление коэффициента безопасности (FS) против разжижения для предполагаемого землетрясения (Youd & Noble, 1997):

$$FS = \left( \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \right) MSF, \quad (6)$$

где MSF - величина фактора масштабирования магнитуды, равная единице для землетрясения с мгновенной магнитудой  $M_w = 7,5$ .

### **Определение коэффициента циклического сопротивления**

Эмпирические методы оценки коэффициента циклического сопротивления (CRR) обычно используют следующие полевые испытания: динамическая пенетрация (SPT), статическая пенетрация конусом (CPT), измерения скорости поперечной волны. Методы SPT и CPT, как правило, предпочтительнее из-за более обширной базы данных и прошлого опыта.

### **Определение CRR методом динамической пенетрации**

Процедуры оценки разжижения на основе SPT основаны на корреляции сопротивления разжижению с скорректированным сопротивлением пенетрации грунтов  $(N_1)_{60}$ . Процесс коррекции включает в себя применение ряда поправочных коэффициентов для измеренного в поле N количества ударов:

1. Построение профилей измеренных N значений и содержания пылеватой фракции в пределах всех потенциально разжижаемых грунтов. Используемое оборудование и процедуры SPT для получения измеренных SPT сопротивлений следует записывать во время исследований и рассматривать во время обработки оценки потенциала разжижения. Важность точности SPT измерений по надежности оценки риска разжижения нельзя переоценить. Интерполяцию SPT N значений и содержания глинистой фракции между точками, на которых они измерялись, следует делать с должным учетом геологии участка исследований.

2. Скорректировать измеренные SPT N - значения с учетом применяемого оборудования и процедур испытания  $(N_1)_{60}$ .

3. Вычислить скорректированное SPT сопротивление чистого песка  $((N_1)_{60,cs})$ .

Наличие глинистой фракции учитывается коррекцией NCEER и Idriss & Boulanger (2004). Способы учета содержания глинистой фракции приведены ниже.

NCEER (Youd et al., 2001):

$$(N_1)_{60,cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60}, \quad (7)$$

где

$$\alpha = \begin{cases} 0 & FC \leq 5\% \\ \exp[1.76 - 190 / FC^2] & 5\% < FC < 35\% \\ 1.0 & FC \geq 35\% \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & FC \leq 5\% \\ 0.99 + FC^{1.5} / 1000 & 5\% < FC < 35\% \\ 1.2 & FC \geq 35\% \end{cases} \quad (7a)$$

и  $FC$  – содержание глинистой фракции в %, которое находится через индекс материала  $I_c$ :

$$\begin{aligned} I_c < 1.31, & \quad FC(\%) = 0 \\ 1.31 \leq I_c < 2.325, & \quad FC(\%) = 43.668 I_c - 57.2 + 10 \sin\left(\left(\frac{I_c - 2.325}{1.015}\right)\pi\right) \\ 2.325 \leq I_c < 3.2, & \quad FC(\%) = 63.62 I_c - 103.59 \\ I_c \geq 3.2, & \quad FC(\%) = 100 \end{aligned} \quad (7b)$$

Idriss & Boulanger (2004):

$$(N_1)_{60,cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}, \quad (7.5-7.6) \quad (8a)$$

где

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left[1.63 + \frac{9.7}{FC} - \left(\frac{15.7}{FC}\right)^2\right] \quad (8b)$$

и  $FC$  – содержание глинистой фракции в %.

Линейная корреляция для  $\Delta(N_1)_{60}$  от  $FC$  показана на рисунке 3, а предлагаемая NCEER – на рисунке 4.

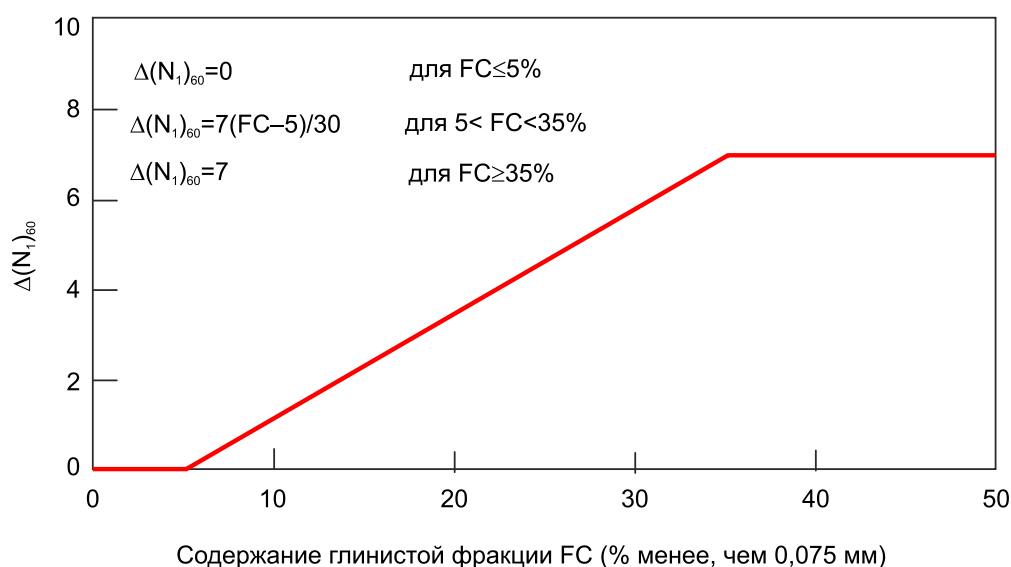


Рис. 3. Корректировка  $\Delta(N_1)_{60}$  от содержания глинистой фракции

На рисунке 4 показаны (Seed et al., 1985) SPT данные совместно с NCEER (1997) кривыми. Приведены четыре графика: а) чистый песок с содержанием глинистой фракции менее чем 5%; б) пылеватый песок с содержанием глинистой фракции между 5 и 15 процентами; в) зависимость с содержанием FC между 15 и 35 процентами и г) грунт с содержанием глинистой фракции более чем 35%. Как видно из рисунка 4, SPT данные измерений и аналитические решения для коэффициента циклического сопротивления достаточно хорошо сочетаются. Для чистого песка (рисунок 4б) имеется достаточно данных для того, чтобы утверждать о существовании линейной зависимости между CRR и  $N$  – значением для грунтов с низким  $N$ -значением, которые имеют тренд к вертикальной асимптоте при 30 ударах на фут (рисунок 4а). Для пылеватого песка ( $FC=15\%$ ) данные хорошо сочетаются с историческими случаями, но нет достаточных данных для подтверждения их стремления к вертикальной асимптоте. Для пылеватого песка ( $5 < FC < 35\%$ ) (рис. 4в) кривые также хорошо сочетаются с предложенными трендами, но нет достаточных данных для подтверждения их стремления к вертикальной асимптоте. Данные для грунта с  $FC$  более 35% (рис. 4г) хорошо совпадают с предложенными трендами. Имеется только одна точка при высоком коэффициенте циклического сопротивления (0,6), которая подтверждает концепцию приближения к вертикальной асимптоте при  $N$  значении около 17.

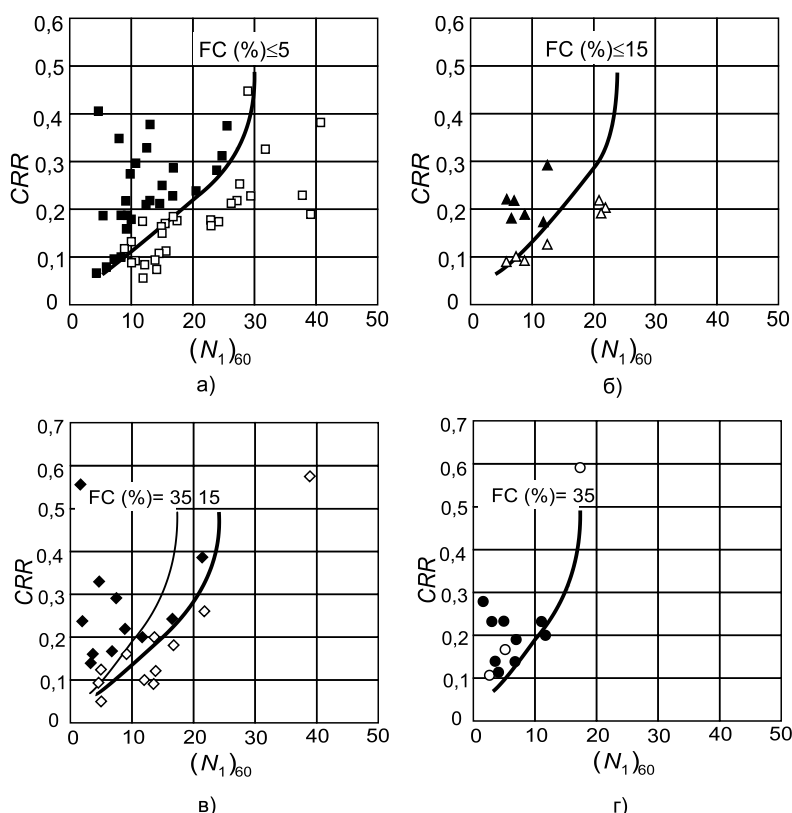


Рис. 4. SPT данные разжижения и CRR кривые (NCEER 1977) при различном содержании пылеватых частиц (FC) (Schneider & Mayne, 1999)



4. Вычислить коэффициент циклического сопротивления при стандартном вертикальном эффективном напряжении в 1 атм. Ниже приведены уравнения для вычисления CRR при 1 атм., предложенные NCEER (2001) и Idriss & Boulanger (2004).

NCEER (Youd et al., 2001):

$$CRR_{\sigma=1} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60,cs}} + \frac{(N_1)_{60,cs}}{135} + \frac{50}{(10(N_1)_{60,cs} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (9)$$

Idriss & Boulanger (2004):

$$CRR_{\sigma=1} = \exp \left[ \frac{(N_1)_{60,cs}}{14,1} + \left( \frac{(N_1)_{60,cs}}{126} \right)^2 - \left( \frac{(N_1)_{60,cs}}{23,6} \right)^3 + \left( \frac{(N_1)_{60,cs}}{25,4} \right)^4 - 2,8 \right] \quad (10)$$

5. Вычислить коэффициент циклического сопротивления при вертикальном эффективном напряжении в исследуемом массиве грунта, используя зависимость:

$$CRR_{\sigma} = CRR_{\sigma=1} \cdot K_{\sigma} \quad (11)$$

где  $K_{\sigma}$  - определяются следующим образом:

NCEER (Youd et al. 2001):

$$K_{\sigma} = \min \left\{ \left( \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right)^{f-1}, 1,0 \right\}, \quad (12)$$

где  $f = 0,7 - 0,8$  для  $I_D = 40 - 60\%$  и  $f = 0,6 - 0,7$  для  $I_D = 60 - 80\%$ .

Idriss & Boulanger (2004):

$$K_{\sigma} = \min \left\{ 1 - C_{\sigma} \ln \left( \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right), 1,0 \right\}, \quad (13)$$

где  $C_{\sigma} = \frac{1}{18,9 - 2,55\sqrt{(N_1)_{60,cs}}}$ , а  $(N_1)_{60,cs}$  ограничено максимальным значением 37.

6. Вычислить коэффициент циклического сопротивления для магнитуды  $M_w = 7,5$ .

Для этого используется базисная зависимость, предложенная NCEER, которая может быть представлена в виде уравнения (Rauch, 1988):

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60,cs}} + \frac{(N_1)_{60,cs}}{135} + \frac{50}{[1 - (N_1)_{60,cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (14)$$

Уравнение (14) справедливо для  $(N_1)_{60,cs} \leq 30$ . Значение  $(N_1)_{60,cs} > 30$  показывает на то, что грунты не могут разжижаться. Уравнение (14) показано на рисунке 5 совместно с данными базисной зависимости, предложенная NCEER (Robertson & Fear, 1996).

7. Значение  $CRR_{M=7,5}$  должно быть приведено к соответствующей магнитуде землетрясения для данной местности. Это выполняется применением коэффициента масштабирования магнитуды (MSF):

$$CRR = CRR_{M=7,5} \cdot MSF, \quad (15)$$

NCEER комитет рекомендует использовать коэффициенты масштабирования магнитуды из зависимости, показанной на рисунке 6.

В аналитическом виде эту зависимость можно представить в виде:

- для  $MSF < 7,0$   $MSF = 10^{3,0} \cdot M_w^{-3,46}$  (16)

- для  $MSF \geq 7,0$   $MSF = 10^{2,24} \cdot M_w^{-2,56}$

где  $M_w$  - момент магнитуды землетрясения.

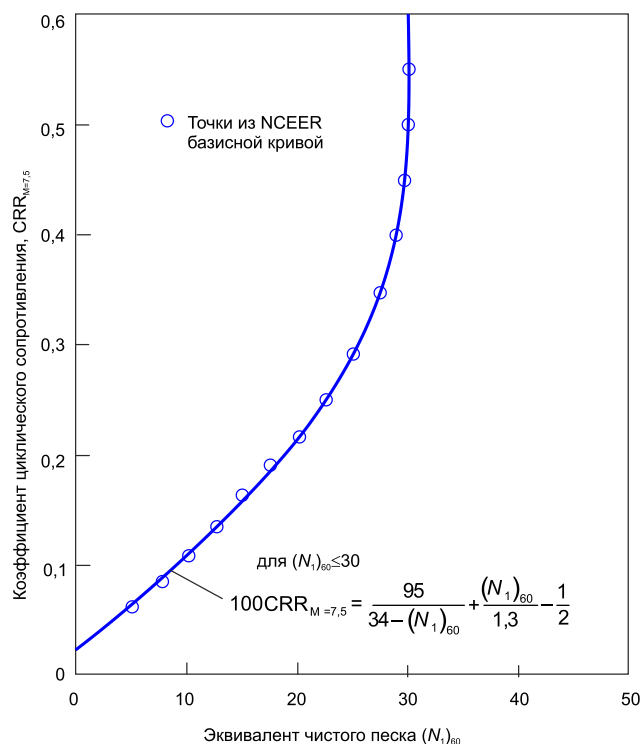


Рис. 5. Базисная зависимость для определения  $CRR_{M=7,5}$  от скорректированного SPT количества ударов (Rauch, 1997)

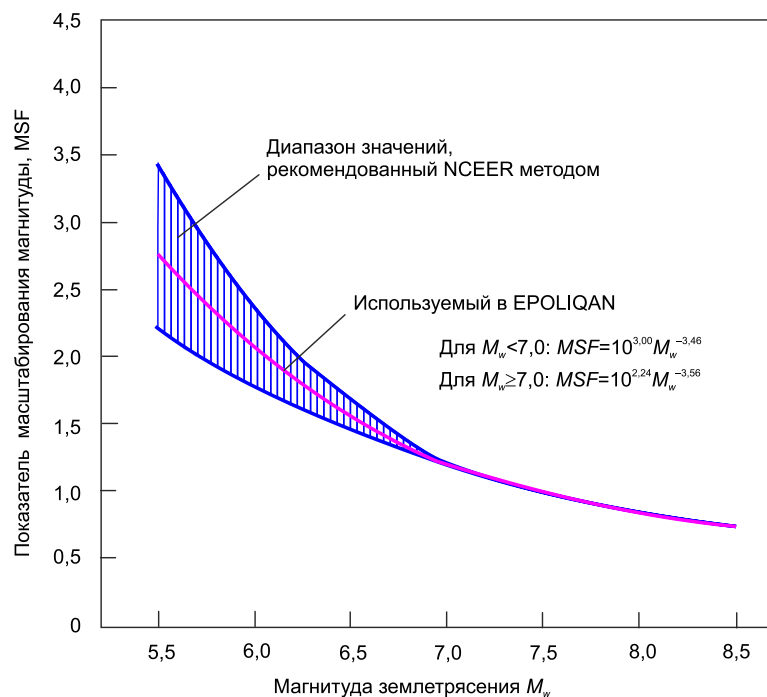


Рис. 6. Коэффициенты масштабирования магнитуды для CRR вычисления (Rauch, 1997)

Верхний предел для  $MSF$  принимается для землетрясений с очень малой магнитудой для которого единственный пик напряжений может иметь место в течении серии колебаний. Значение, равное 1,8 получено из рассмотрения серии землетрясений малой магнитуды, характеризующее единственным всплеском напряжений со всеми другими малыми циклами напряжений, которыми можно пренебречь. Результирующая зависимость приведена на рисунке 7.

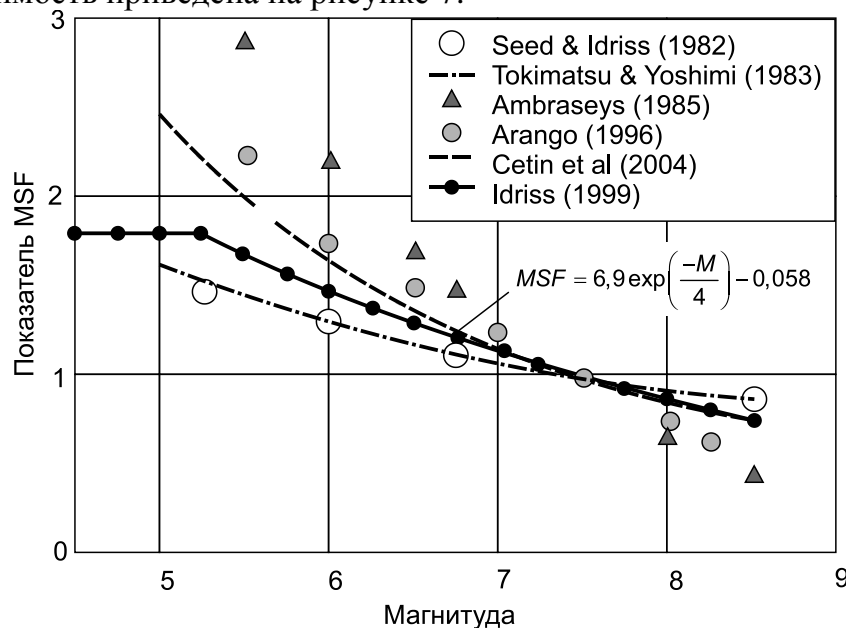


Рис. 7. Эффект влияния магнитуды на показатель уменьшения напряжений (Idris & Boulanger, 2010)

Блок схема вычислений для определения коэффициента циклического сопротивления и нахождения толщины слоя грунта в массиве, обладающего потенциалом разжижения, показана на рисунке 8, а профили SPT, CRS и CRR – на рисунке 9.

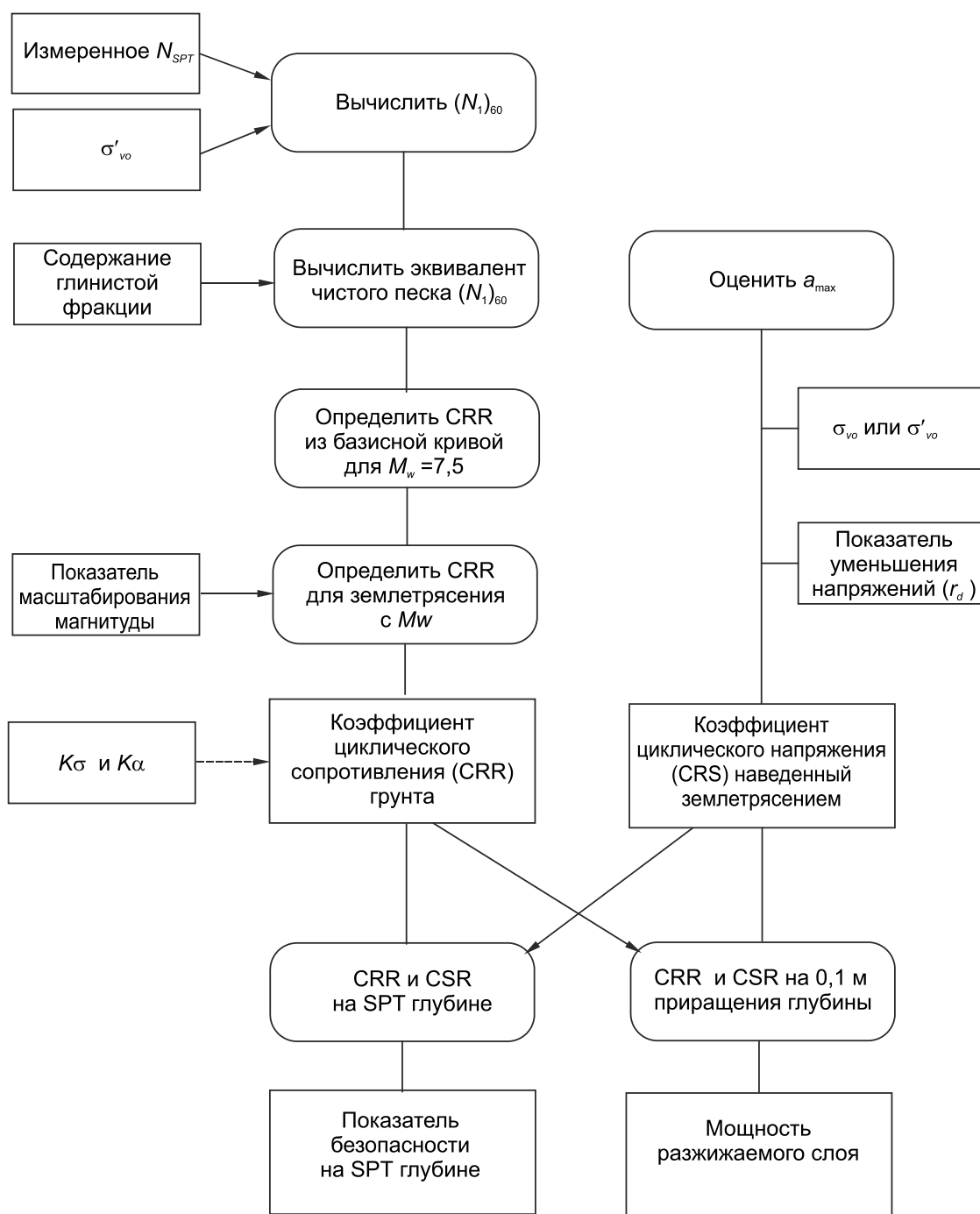


Рис. 8. Блок схема для определения толщины слоя разжижаемого грунта на основе SPT испытаний (Rauch, 1997)

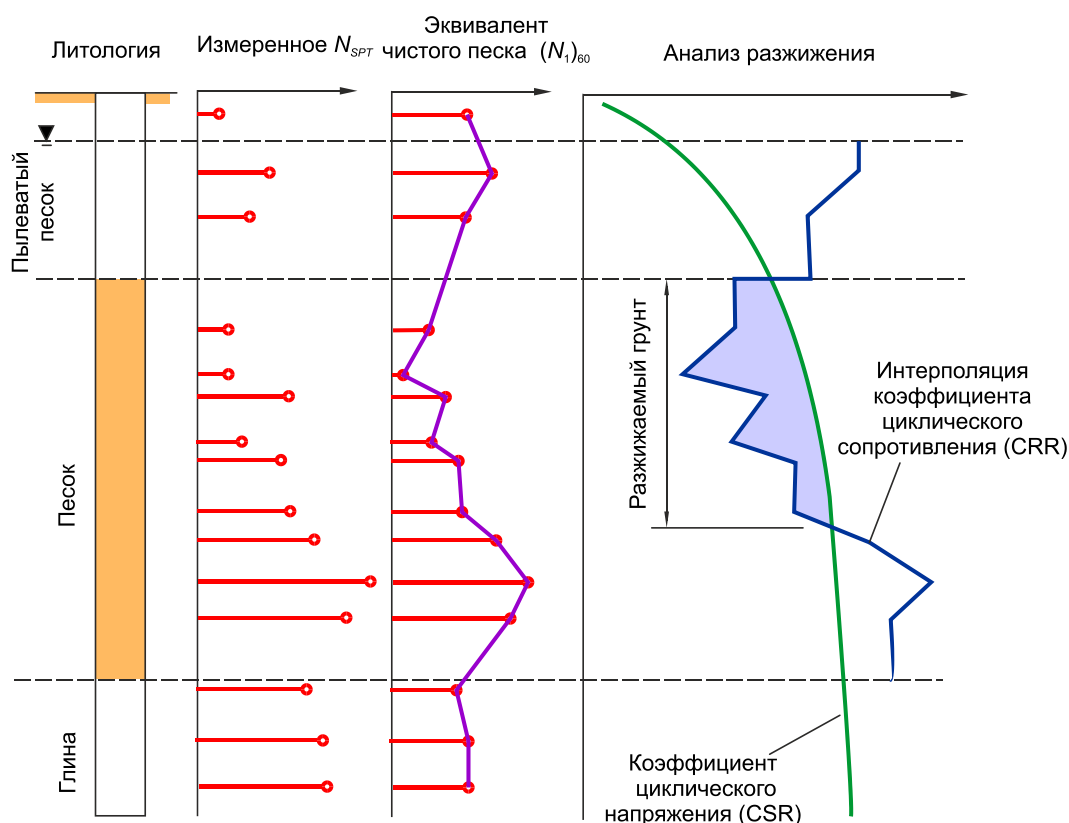


Рис. 9. SPT данные для определения толщины слоя грунта с потенциалом к разжижению (Rauch, 1997)

### Определение CRR методом статической пенетрации

CPT процедуры были разработаны аналогично SPT процедурам. До сравнительно недавнего времени, однако, было доступно меньше данных для калибровки CPT, чем для SPT процедуры. На процедуры, основанные на CPT, влияет тот факт, что образцы грунта не отбираются при проведении CPT испытаний, в отличие от SPT. Поскольку процедуры на основе SPT показали, что на сопротивление разжижению влияет содержание глинистой фракции (которое можно измерить с помощью отобранных образцов из этого испытания), то процедуры на основе CPT должны пытаться учитывать наличие глинистой фракции косвенно с использованием параметров, измеренных в CPT, как правило, коэффициента трения.

Процедуры оценки разжижения на основе CPT основаны на корреляциях между сопротивлением разжижению и скорректированным лобовым сопротивлением. Процесс коррекции и использование скорректированных лобовых сопротивлений для вычисления CRR может быть представлен в виде следующих шагов:

1. Построить профили измеренного лобового сопротивления ( $q_c$ ), сил трения ( $f_s$ ) и коэффициента трения ( $R_f$ ) для всех потенциально разжижаемых грунтов.
2. Скорректировать измеренное лобовое сопротивление с эффективным напряжением от собственного веса грунта:

$$q_{cl} = C_N q_c, \quad (17)$$

где  $C_N$  - находится следующим образом (NCEER, Youd et al., 2001):



$$C_N = \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{1,338-0,249(q_{c1}/p_a)^{0,264}} \leq 1,7, \quad (18)$$

*Примечание.* Так как  $q_{c1}$  необходимо для вычисления  $C_N$ , от которого зависит  $q_{c1}$ , то требуются итерации. Блок схема данной процедуры приведена на рисунке 10 (Moss et al., 2006).

$$C_N = \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{-c}, \quad (19)$$

где  $c = 0,78q_{c1}^{-0,33} \left( R_f [\log(10 + q_c)]^{-1,21} \right)^{0,32q_c^{-0,35}-0,49}$ .

3. Нормализовать скорректированное лобовое сопротивление:

$$q_{c1N} = q_{c1} / p_a. \quad (20)$$

4. Вычислить скорректированное лобовое сопротивление для чистого песка.

Эффекты глинистой фракции могут быть учтены с использованием зависимости

5.

$$q_{c1N,cs} = K_c q_{c1N}, \quad (21)$$

где  $K_c$  - коэффициент корректировки содержания глинистой фракции, находится по процедуре, приведенной на рисунке 10.

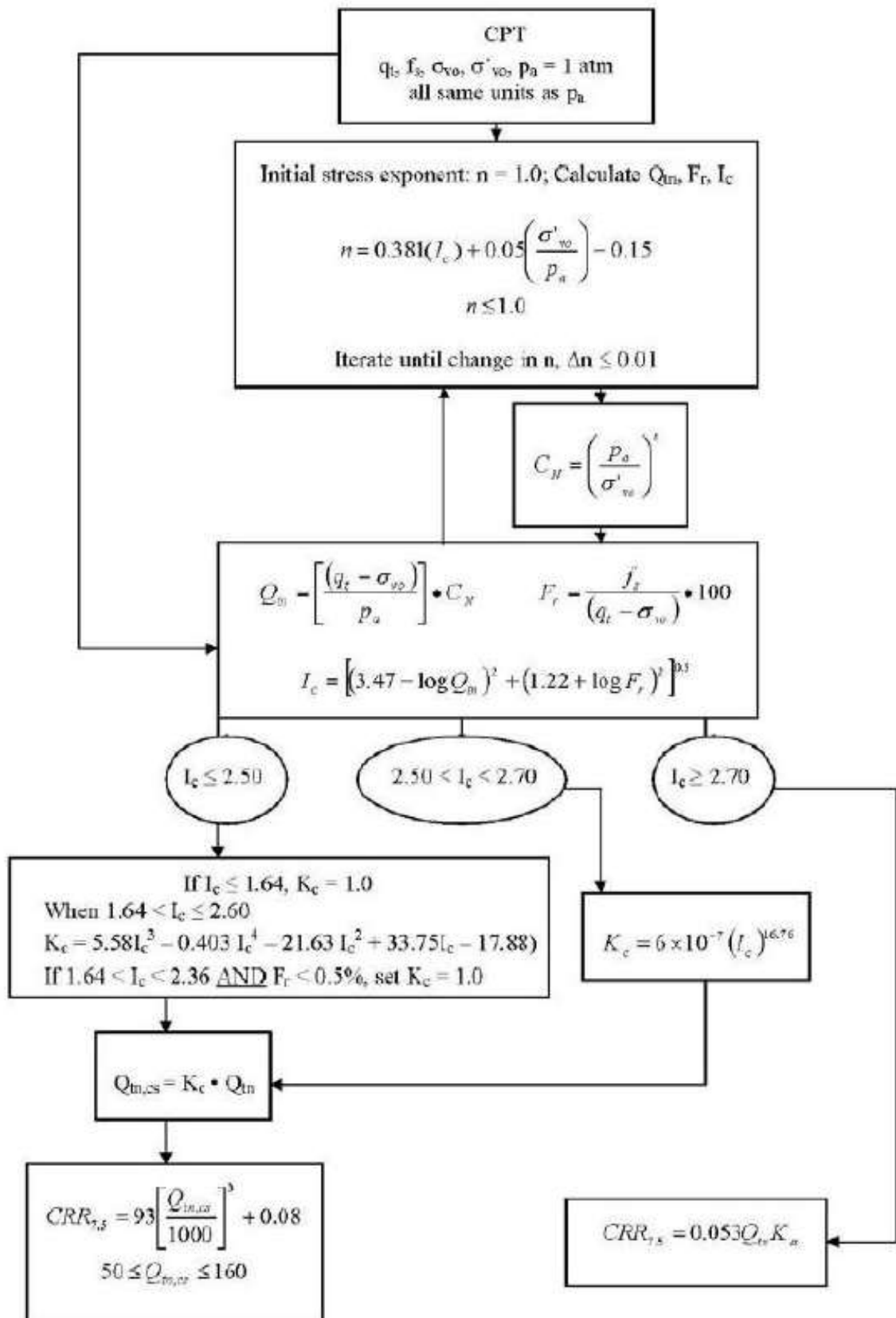


Рис. 10. Процедура определения коэффициента циклический напряжений (Youd et al., 2001)

5. На пятом этапе требуется рассмотреть потенциал «эффектов тонкого слоя», связанный с относительно тонкими, жесткими слоями в профиле зондирования. Наличие тонких гранулированных слоев в более мягких материалах не редкость во многих речных отложениях, что может привести к измерению лобовых сопротивлений, которые представляют собой действительную плотность тонкого гранулированного слоя. Были предложены процедуры коррекции тонкого слоя, однако они основаны на теории упругости, которая считается ограниченно применимой к задаче разжижения. Общеизвестно, что СРТ сопротивления вблизи границ слоя могут локально зависеть от этих границ, и что отдельные значения  $q_{c1}$  в пределах примерно 1 м у таких границ могут быть неточными. Для более общего случая гранулированного слоя, находящегося между более мягкими слоями, эффект более мягких слоев будет заключаться в уменьшении измеренного лобового сопротивления, что приведет к консервативной оценке потенциала разжижения. Если такие условия существуют и приводят к заключению о предельном разжижении (например, коэффициент безопасности немного выше или ниже 1,0), то результат должен быть переоценен с учетом геологических условий и данных с образцами грунтов.

6. Вычисление коэффициента циклического сопротивления при стандартном эффективном вертикальном напряжении в 1 атм, используя уравнение:

Idriss & Boulanger (2004):

$$CRR_{\sigma=1} = \exp \left[ \frac{q_{c1N}}{540} + \left( 67 \frac{q_{c1N}}{540} \right)^2 - \left( \frac{q_{c1N}}{80} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1N}}{114} \right)^4 - 3 \right] \quad (23)$$

6. Вычисление коэффициента циклического сопротивления при напряжениях от собственного веса грунта в массиве выполняется с использованием зависимости:

$$CRR_{\sigma} = CRR_{\sigma=1} K_{\sigma}, \quad (13.24)$$

где  $K_{\sigma}$  - определяется следующим образом:

Idriss & Boulanger (2004):

$$K_{\sigma} = \min \left\{ 1 - C_{\sigma} \ln \left( \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right), 1,0 \right\}, \quad (25)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{37,3 - 8,27(q_{c1N})^{0,264}} \quad (26)$$

и  $q_{c1N}$  ограничено максимальным значением 211.

На рисунке 11 приведены зависимости для определения коэффициента циклического сопротивления при магнитуде  $M=7,5$  при различном содержании глинистой фракции. Данные зависимости рекомендуется использовать как эталон для определения CRR при  $M=7,5$ . Для приведения CRR к другой магнитуде используется уравнение (27).

$$CRR = CRR_{7,5} \cdot MSF \cdot K_{\sigma} \quad (27)$$

где  $MSF$  - коэффициент масштабирования магнитуды, является поправочным коэффициентом для землетрясений с магнитудой, отличной от 7.5, и  $K_{\sigma}$  является поправочным коэффициентом для использования там, где эффективные напряжения от собственного веса грунта более 96 кПа. Для эффективных напряжений менее 96 кПа коррекция  $K_{\sigma}$  не требуется. Вышеупомянутая процедура должна использоваться только

для условий ровной поверхности местности. Наклонные поверхности грунтов представляют дополнительные проблемы, требующие использования дополнительного поправочного коэффициента  $K_\alpha$  (Youd et al., 2001).

Коэффициент масштабирования магнитуды  $MSF$  можно найти из таблицы, приведенной ниже (Seed & Idris, 1982).

Магнитуда	$MSF$
5,5	1,43
6,0	1,32
6,5	1,19
7,0	1,08
7,5	1,00
8,0	0,94
8,5	0,89

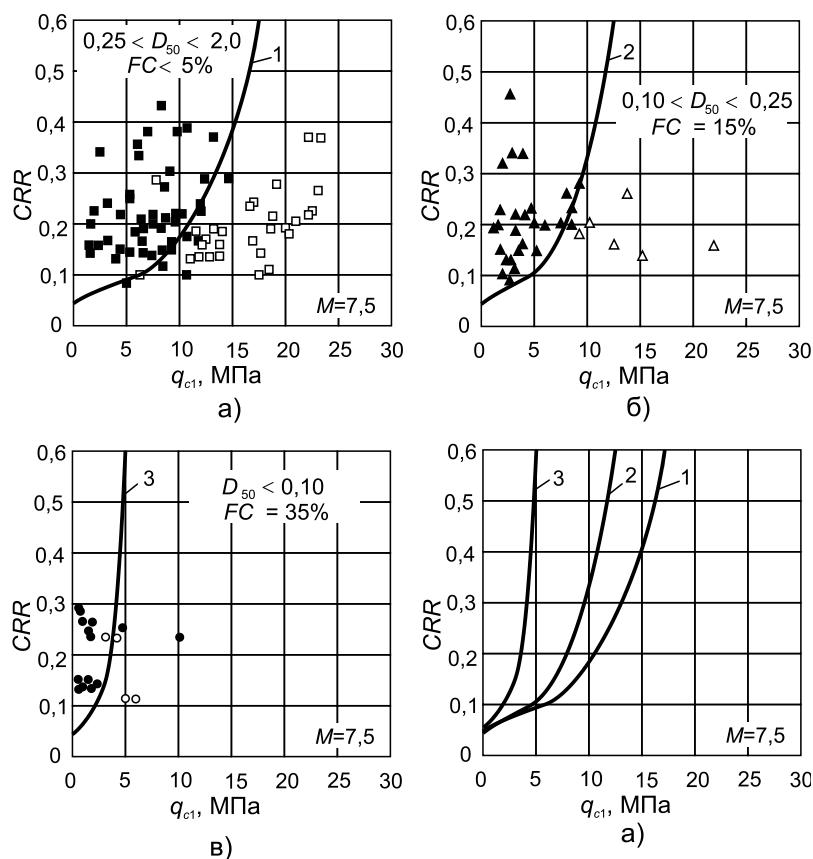


Рис. 11. CPT данные разжижаемости и NCEER рекомендации для определения CRR при магнитуде  $M=7.5$ : NCEER зависимости (Schneider & Mayne, 1999)

### Оценка потенциала разжижения на основе скорости поперечных волн

Андрус и Стокое (Andrus & Stokoe 1997, 2000) высказали предположение, что скорость поперечной волны, полученная сейсмическим зондом, может использоваться для оценки чувствительности к разжижению, и этот подход был одобрен MCEER (Youd et al., 2001). Однако измерения скоростей сейсмических волн проводятся при малых деформациях, в то время как возникновение избыточного порового давления и начало

разжижения проявляется при среднем или высоком уровне деформации. Следовательно,  $V_s$  не следует использовать как единственный индикатор сопротивления разжижению. Необходимы другие испытания для обнаружения слабоцементированных грунтов, которые могут иметь высокие значения  $V_s$  из-за высокой жесткости при малых деформациях сдвига.

На рисунке 12 показана зависимость между нормализованной скоростью сдвига,  $V_{s1}$  и CRR, предложенная Youd et al. (2001):

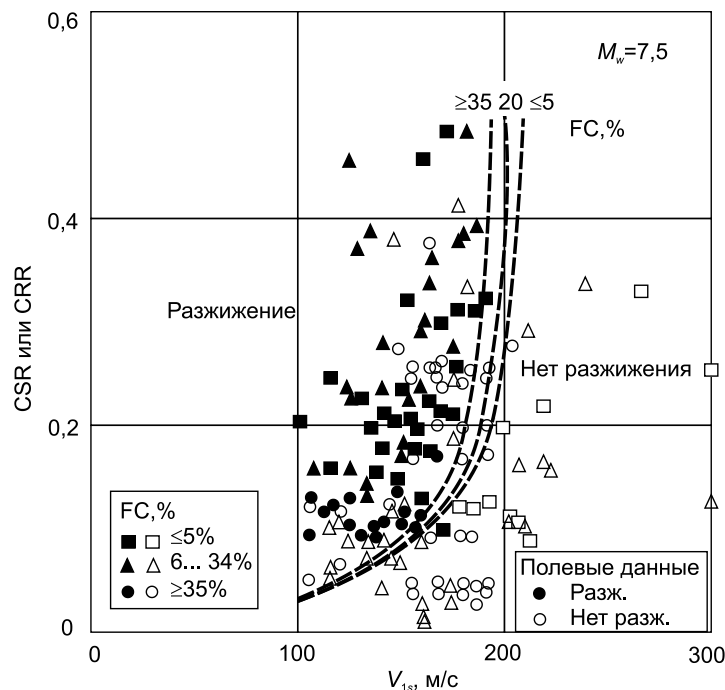


Рис. 12. Кривые для оценки возможности разжижения, рекомендованные для чистых, несцементированных грунтов с данными разжижения из известных исторических случаев (Andrus & Stokoe, 2000). Данные основаны на  $M_w$  от 5,9 до 8,3

$$V_{s1} = V_s \left( \frac{p_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.25} \quad (28)$$

где  $V_{s1}$  - скорректированная скорость поперечной волны;  $p_a$  - атмосферное давление, приблизительно равное 100 кПа;  $\sigma'_{vo}$  - начальное эффективное вертикальное напряжение в тех же единицах, что и  $p_a$ .

Уравнение 28 неявно предполагает постоянный коэффициент бокового давления в состоянии покоя  $K_0$ , который приблизительно равен 0,5 для массивов грунтов, подверженных разжижению.

Применение уравнения 28 также неявно предполагает, что  $V_s$  измеряется как по направлениям движения упругой волны, так и с волнами, поляризованными вдоль главных направлений напряжений, и одно из этих направлений является вертикальным (Stokoe et al., 1985). Кривые на рисунке 12 были рекомендованы Андрусом и Стоко (Andrus & Stokoe, 2000) и применимы к землетрясениям магнитудой 7,5 баллов в несцементированных голоценовых грунтах.

Andrus & Stokoe (1997) было предложено выражение, модернизированное Andrus et al. (1999):



$$CRR_{7,5} = a \cdot \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \cdot \left( \frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right), \quad (29)$$

где  $V_{s1} = V_s / (\sigma'_{v0})^n$  является нормализованной скоростью сдвига используя экспоненту напряжения  $n = 0,25$  и  $\sigma'_{v0}$  в кПа (Robertson et al., 1992b);  $V_{s1}^*$  - предельное верхнее значение  $V_{s1}$  для текущего разжижения; а и b - коэффициенты, определяемые методом подгонки, равные 0,022 и 2,8, соответственно.

Предельное значение скорости поперечных волн в песчаных грунтах может быть оценено, как:

$$V_{s1}^* = 215 \text{ м/с } FC(\%) \leq 5$$

$$V_{s1}^* = 215 - 0,5 \cdot (FC - 5) \text{ м/с } 5 < FC(\%) \leq 15 \quad (30)$$

$$V_{s1}^* = 200 \text{ м/с } FC(\%) \geq 35$$

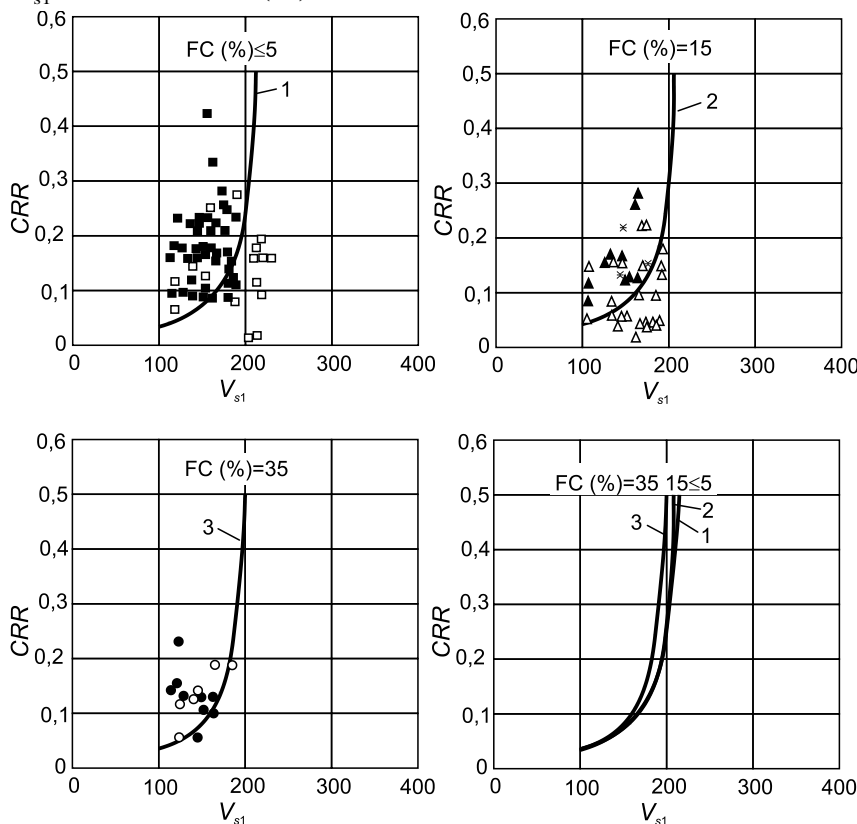


Рис. 13.  $V_s$  данные разжижения и рекомендованные CRR кривые (NCEER зависимости)

На рисунке 13 представлены данные измерений, выполненные Andrus & Stokoe (1997) и полученные с использованием уравнения (29). Можно отметить достаточно хорошее совпадение расчетных кривых с данными полевых измерений.

### Определение вероятности разжижения песков при динамических нагрузках по СП 47.13330-2012

Рекомендуется выполнять для песков по таблице И.8. Зависимости не распространяются на пылеватые насыщенные водой пески.

Т а б л и ц а И.8

$p_d$ , МПа		Вероятность разжижения песков при динамических нагрузках
среднее	минимальное	
Менее 1,5	Менее 0,5	Большая вероятность разжижения (пески рыхлого сложения, сцепление практически отсутствует)
От 1,5 до 2,7	От 0,5 до 1,1	Разжижение возможно (пески рыхлые или средней плотности со слабо развитым сцеплением)
От 2,7 до 3,8	От 1,1 до 1,6	Вероятность разжижения невелика (пески средней плотности с развитым сцеплением)
Более 3,8	Более 1,6	Разжижение песков практически невозможно (пески плотные и средней плотности с хорошо развитым сцеплением)
Пр и м е ч а н и е -Оценка разжижаемости песков производится по средним значениям $p_d$ . Учет минимальных значений повышает достоверность прогноза.		

### Пример оценки способности грунтов к разжижению

Характеристика площадки изысканий обычно включает в себя синтез информации из различных источников: от аэрофотоснимков до полевых и лабораторных испытаний. Анализ способности грунтов к разжижению может быть выполнен различными путями, с выбором соответствующего подхода в зависимости от конкретных характеристик каждого объекта и потенциальных последствий разжижения, которые вызывают наибольшую озабоченность.

Ключевой особенностью анализа способности грунтов к разжижению является рассмотрение геологических условий с точки зрения их однородности или неоднородности грунтов и того, как это может относиться к потенциальным последствиям разжижения (например, разжижение изолированных случайных карманов по сравнению с непрерывным слоем, который может вызвать значительную осадку или скольжение к свободной поверхности). Следует заметить, что некоторые моды деформации для данного сооружения могут зависеть больше от средних свойства конкретных слоев, тогда как другие моды деформации могут в большей степени зависеть от самых слабых зон в основании.

Пример анализа способности грунтов к разжижению приведен ниже из работы (Idris & Boulanger 2008) и основан на данных SPT и CPT испытаний, выполненные рядом друг с другом на одной площадке, где наблюдалось разжижение грунта с горизонтальным смещением во время землетрясения 1989 года в Loma Prieta. Результаты анализа приведены для SPT на рисунке 14, для CPT на рисунке 15 и показывают на хорошее совпадение.

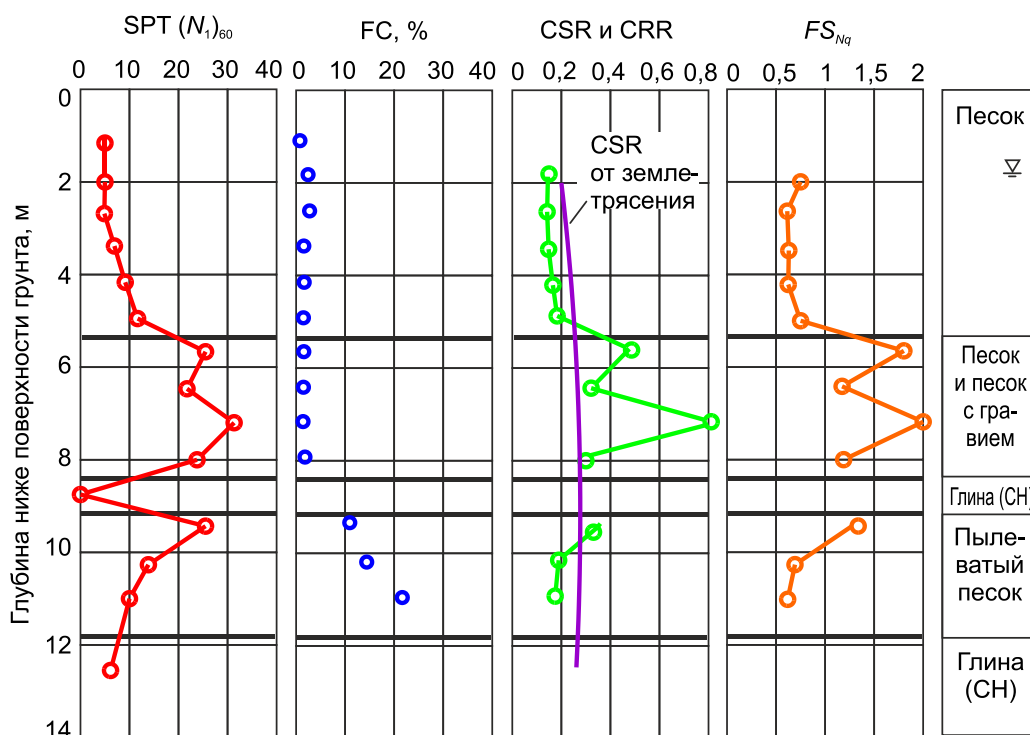


Рис. 14. Пример анализа способности к разжижению по данным динамического зондирования

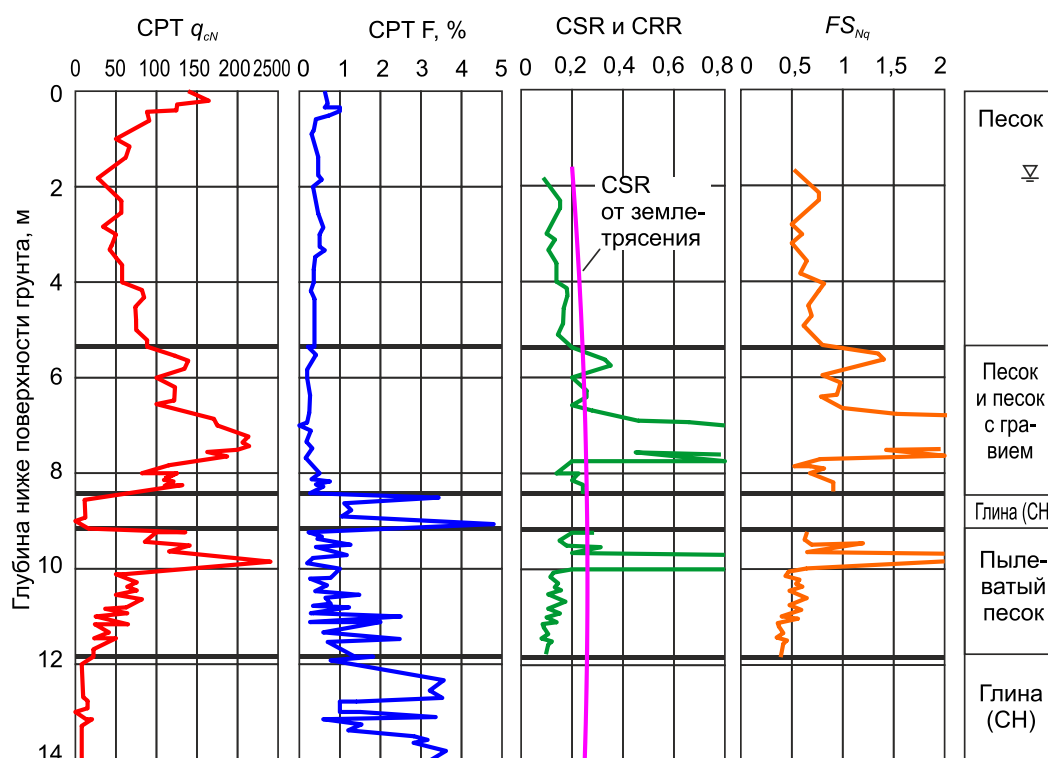


Рис. 15. Пример анализа способности к разжижению по данным статического зондирования

**Практическая реализация методов оценки потенциала грунтов к разжижению**

Для этой цели разработан модуль «Оценка разжижаемости грунтов», который входит в программу Geotek Field (рис. 16).

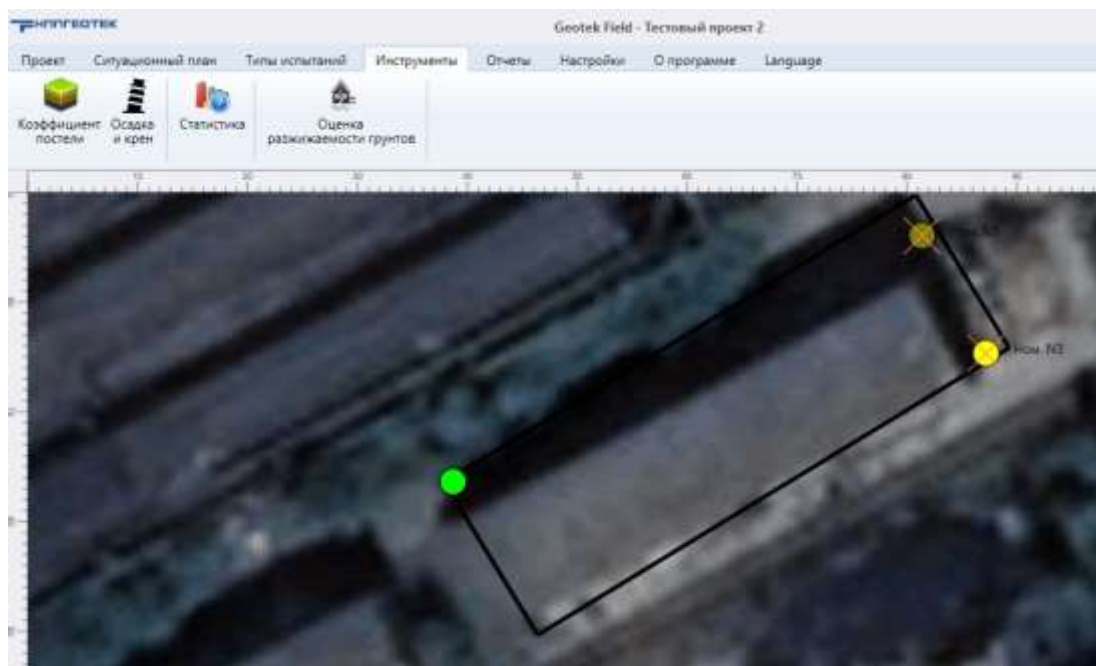


Рис. 16. Расположение выработок на плане здания

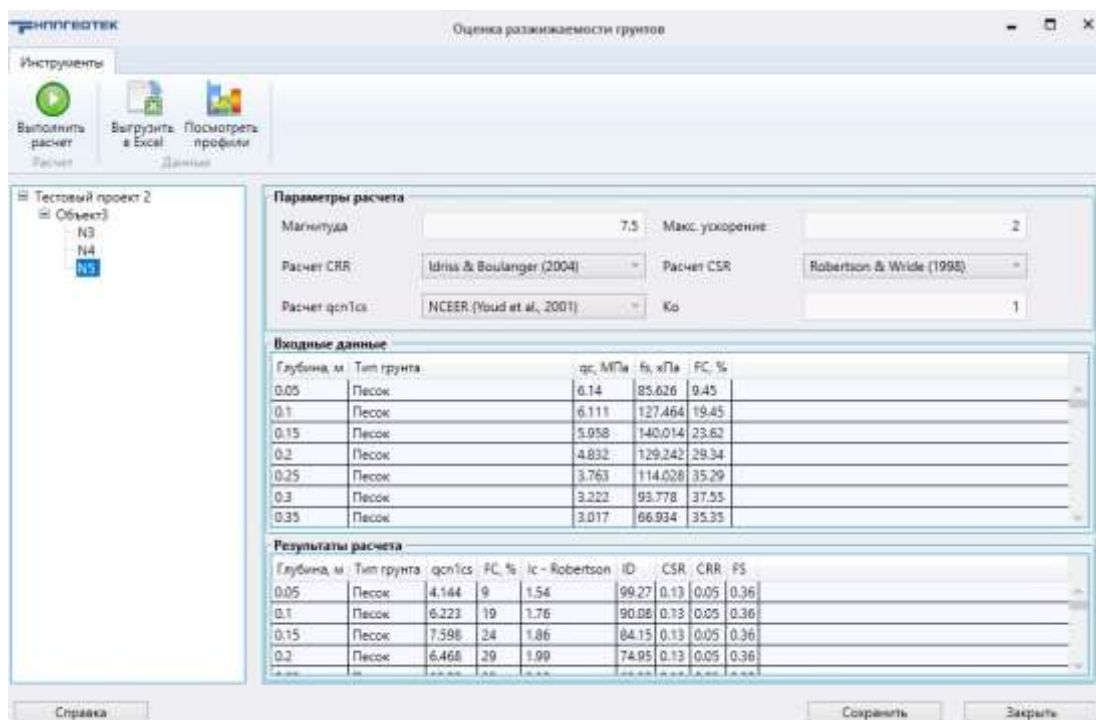


Рис. 17. Результаты расчетов по выработке номер 5

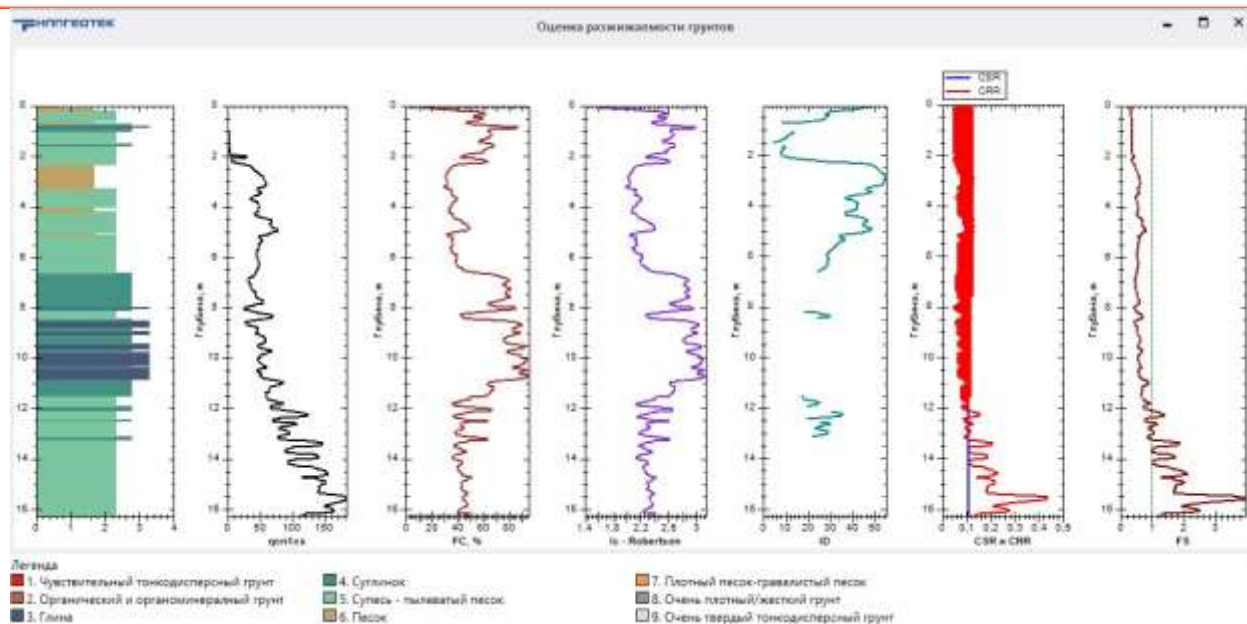


Рис. 18. Профили типа поведения грунтов, параметры зондирования, коэффициенты CSR, CRR и безопасности

Результаты расчетов показывают, что песчаные грунты до глубины 13 м потенциально разжижаемы.

### 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.».