



# СЕЙСМИЧЕСКАЯ РАЗЖИЖАЕМОСТЬ ГРУНТОВ: ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА И КЛАССИФИЦИРОВАНИЕ

## SEISMIC LIQUEFACTION OF SOILS: ENGINEERING EVALUATION AND CLASSIFICATION

### ВОЗНЕСЕНСКИЙ Е.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., eugene@geol.msu.ru

### КУШНАРЕВА Е.С.

Научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., kushlena@gmail.com

### VOZNESENSKY E.A.

Professor, Lomonosov Moscow State University, faculty of the geology, department of engineering and ecological geology, doctor of science (Geology and Mineralogy), eugene@geol.msu.ru

### KUSHNAREVA E.S.

Researcher, Lomonosov Moscow State University, faculty of the geology, department of engineering and ecological geology, kushlena@gmail.com

#### Ключевые слова:

пески; сейсмическая разжижаемость; классификация песков по разжижению; сжимающие напряжения; гранулометрический состав; разжижение грунта.

#### Key words:

sands; seismic liquefaction; liquefaction classification of sands; confining stresses; grain-size distribution; liquefaction.

#### Аннотация

**В статье рассматриваются существующие методы оценки сейсмической разжижаемости дисперсных грунтов и предлагается классификация песков по этому признаку на основе общепринятых методов инженерно-геологической разведки с учетом величин сжимающих напряжений и гранулометрического состава грунта. Предложенная классификация позволяет по результатам полевых работ обоснованно выделить те геологические тела (слои, линзы, горизонты), для которых необходима экспериментальная оценка разжижаемости и возможных последствий разжижения; обеспечить отбор проб для этих исследований; обоснованно исключить из рассмотрения и дополнительного опробования неразжижаемые грунты; определить состав последующих экспериментальных исследований.**

#### Abstract

**The paper presents a state-of-the-art of the existing methods for evaluation of seismic liquefaction of soils and liquefaction classification of sands based on commonly adopted methods of geotechnical site investigations with consideration of confining stress and soil grain-size distribution. The developed classification allows basing on the data from site investigations, firstly, to select soundly those geological bodies (layers, lenses, horizons) which must be experimentally studied for evaluation of their liquefaction possibility and its consequences, secondly, to provide necessary probes for these studies, thirdly, to exclude soundly from future studies non-liquefiable species and, fourthly, to determine the type and method of subsequent experimental investigations.**

#### Введение

Оценка возможности разжижения водонасыщенных дисперсных грунтов при ожидаемых землетрясениях и его возможных последствий является важнейшей и комплексной инженерной задачей изысканий для проектирования и строительства сооружений в сейсмических районах.

Анализу механизма сейсмического разжижения грунтов, основных факторов, влияющих на их разжижаемость, методам экспериментальной и экспертной оценки возможности разжижения и его последствий посвящено большое количество специальных научных публикаций, обзор которых приведен, в частности, в монографии [2].

Под *сейсмическим разжижением грунтов* авторами понимается частный случай их динамического разжижения, представляющего собой переход водонасыщенных дисперсных грунтов в текучее состояние в результате разрушения структурных связей под действием сейсмических волн.

Возможны два механизма разжижения грунтов.

1. Разжижение *несвязного или слабосвязного грунта*, вызываемое стремлением рыхлой системы к сокращению объема при прохождении волн напряжений и «взвешиванием» частиц в воде с резким падением эффективных напряжений вплоть до их исчезновения и сопровождаемое уплотнением грунта с отжатием воды из его пор.

2. Разжижение *связного грунта*, вызываемое резким снижением его прочности в результате разрушения коагуляционной структурной сетки и падения эффективных напряжений при прохождении сейсмической волны. В результате развиваются огромные деформации, проявляющиеся как течение грунтовой массы без ее заметного уплотнения.

Целью данной работы является обзор существующих методов оценки сейсмической разжижаемости дисперсных грунтов и представление разработанной авторами классификации песков по этому признаку на основе общепринятых методов инженерно-геологической разведки с учетом величин сжимающих напряжений и гранулометрического состава грунта.

Таблица 1

Полевые методы определения динамических свойств грунтов*		
Сейсмоакустические	Вибрационные	Геотехнические
сейсмическое зондирование; сейсмопросвечивание; сейсмокаротаж; метод поверхностных волн	метод резонансного фундамента; метод «водяной пушки»; метод «цилиндра в массиве»; измерения свободных и вынужденных колебаний фундаментов	динамическое зондирование; стандартная пенетрация (SPT); виброндирование; статическое зондирование (CPT); беккер-пенетрация (BPT); вибропенетрация; динамические испытания свай; динамическое нагружение штампов;

\* Курсивом в таблице выделены методы, используемые для оценки возможности сейсмического разжижения песчаных грунтов.

## Методы оценки разжижаемости грунтов

Для оценки сейсмической разжижаемости грунтов в современной мировой практике используется величина *потенциала разжижения*  $F_L$ , имеющего физический смысл коэффициента запаса:

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} = \frac{\text{сопротивление разжижению}}{\text{сейсмическая нагрузка}}, \quad (1)$$

где  $CSR$  — приведенная амплитуда динамических касательных напряжений (cyclic stress ratio), д.ед.;  $CRR$  — критическое значение приведенной амплитуды динамических касательных напряжений (cyclic resistance ratio), д.ед.

Величина  $CSR$  определяется расчетом по прогнозируемым параметрам ожидаемого (проектного или максимального расчетного) землетрясения, а  $CRR$  — экспериментально при лабораторных испытаниях. Для их расчета используются следующие выражения:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma'_v}{\sigma_v} \cdot r_d; \quad (2)$$

$$CRR = \frac{\tau_{cr}}{\sigma'_v}, \quad (3)$$

где  $\tau_{av}$  — среднее значение ожидаемых циклических напряжений сдвига при данной магнитуде, кПа;  $\tau_{cr}$  — амплитуда напряжений, вызывающая разжижение грунта, кПа;  $\sigma'_v$ ,  $\sigma_v$  — соответственно эффективное и полное значения природных вертикальных напряжений на глубине залегания грунта, кПа;  $a_{max}$  — пиковое сейсмическое ускорение колебаний на поверхности массива, см/с<sup>2</sup>;  $r_d$  — коэффициент снижения напряжений с глубиной, д.ед.;  $g$  — ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup> [22].

Инженерная оценка разжижаемости грунтов при ожидаемых землетрясениях сводится к получению надежных ответов на следующие вопросы.

1. Возможно ли разжижение грунтов при данных параметрах сейсмического воздействия?
2. Если оно возможно, то какова ожидаемая величина вертикальной осадки поверхности массива в результате уплотнения грунтов после их разжижения?
3. Возможно ли образование грифонов (sand boils) на поверхности массива в результате разжижения грунтов?
4. Какова возможная амплитуда латеральных деформаций грунтов, выражающихся в их растекании на склонах и оползнеобразовании?

Ключевым является первый вопрос, поскольку только при положительном ответе на него требуют обязательных ответов и все остальные.

Для решения вопроса о возможности сейсмического разжижения грунтов при заданных характеристиках ожидаемых землетрясений сегодня могут использоваться:

- 1) полевые методы оценки динамических свойств грунтов;
- 2) лабораторные методы динамических испытаний грунтов;
- 3) лабораторные методы динамических испытаний физических моделей геологических тел, земляных сооружений, грунтовых оснований (испытания на вибростолах, центробежное моделирование на геотехнических центрифугах).

В данной статье мы сосредоточимся на возможности получения адекватного решения с помощью методов только первых двух групп, поскольку методы третьей группы из-за их технической сложности и обычно высокой стоимости не предназначены для широкого использования в составе инженерно-геологических изысканий.

Не пытаясь вернуться к «вечной» дискуссии о преимуществах и недостатках полевых и лабораторных методов исследований, следует особо подчеркнуть: тогда как лабораторные динамические испытания образцов дают однозначный ответ на вопрос о возможности разжижения грунта (разумеется, при условии адекватного моделирования исходных условий), полевые методы обеспечивают именно оценку возможности их разжижения с определенной долей вероятности. Причина этого заключается в том, что используемые сегодня полевые методы базируются на эмпирических корреляционных зависимостях между непосредственно измеряемыми характеристиками грунтов в массиве и их сопротивлением разжижению без моделирования ожидаемых сейсмических воздействий в этом массиве, то есть без проведения собственно эксперимента по динамическому нагружению грунта.

Среди полевых методов определения динамических свойств грунтов (табл. 1) лишь четыре — сейсмическое зондирование, динамическое зондирование, стандартная пенетрация и статическое зондирование с пьезоконусным зондом — используются для оценки возможности сейсмического разжижения грунтов, притом исключительно песчаных.

Наиболее детально разработана методика оценки разжижаемости песков по результатам испытаний на



стандартную пенетрацию (SPT), которые представляют собой динамическое зондирование со стандартным тонкостенным грунтоносом Реймонда вместо привычного для отечественной практики конического зонда. Этот метод получил наиболее широкое распространение в североамериканской практике инженерных изысканий в соответствии со стандартом [11]. При оценке сейсмической разжижаемости Г.Б. Сид с соавторами [24] исходили из сопоставления измеренного в массиве сопротивления песчаных грунтов стандартной пенетрации с реально наблюдавшимися фактами их разжижения или, напротив, отсутствия этого эффекта при сильных землетрясениях (с магнитудой 7,5) в историческом прошлом. Сопоставление этих данных при известных величинах сейсмической нагрузки

(CSR) позволило получить эмпирическую номограмму, приведенную в ее современном виде на рис. 1. По существу, этот подход позволяет оценить критическое значение приведенной амплитуды динамических касательных напряжений (CRR) на основе определенным образом обработанных (нормированных по стандартной энергии удара) данных испытаний на стандартную пенетрацию, а затем рассчитать потенциал разжижения, базируясь на характеристиках ожидаемого сейсмического события.

Присутствие в грунте даже небольшого количества гравийно-галечного материала исключает применение стандартной пенетрации для оценки его разжижаемости. Для таких толщ разработан специальный пенетрационный комплекс испытаний на базе самоходной

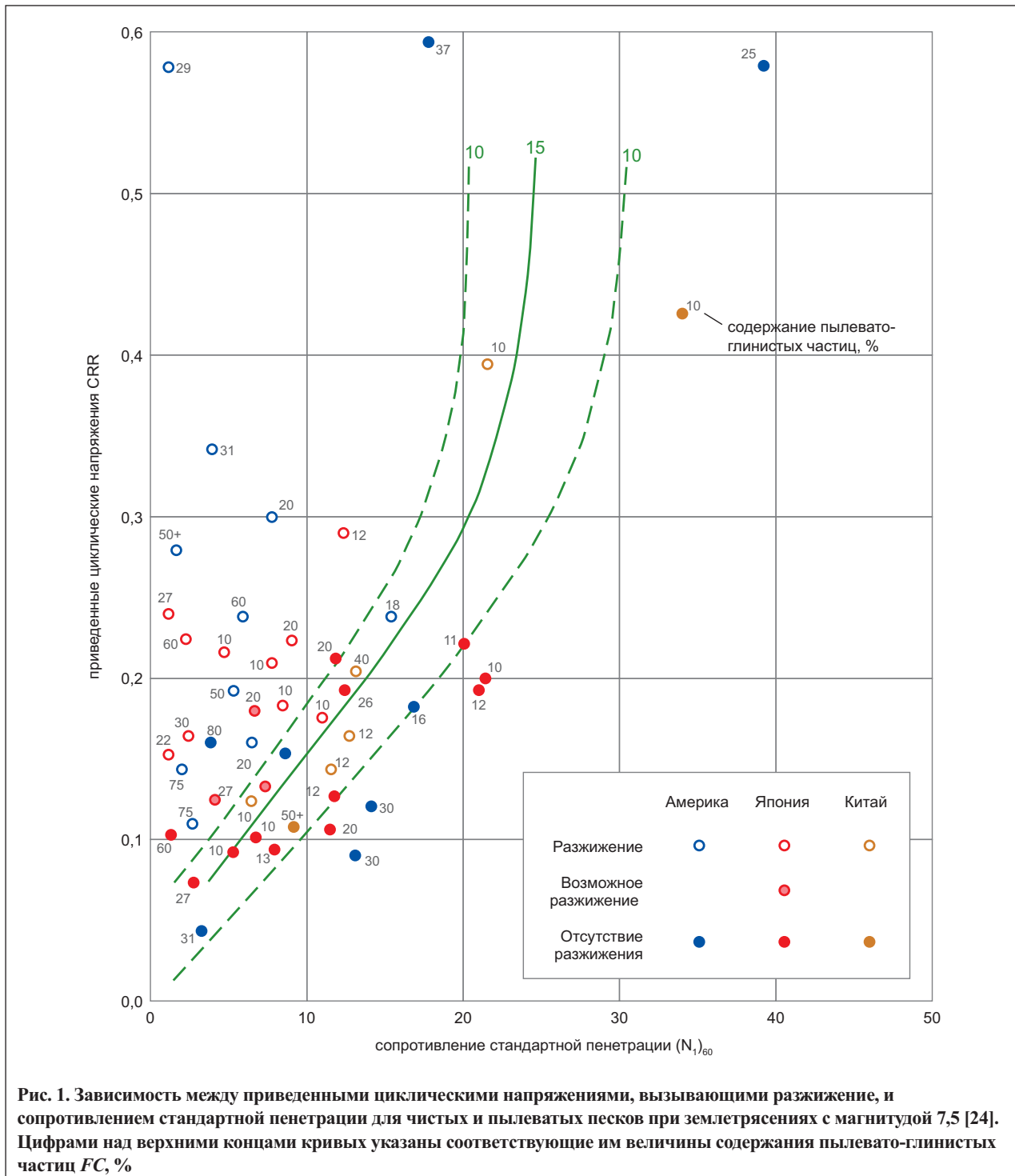
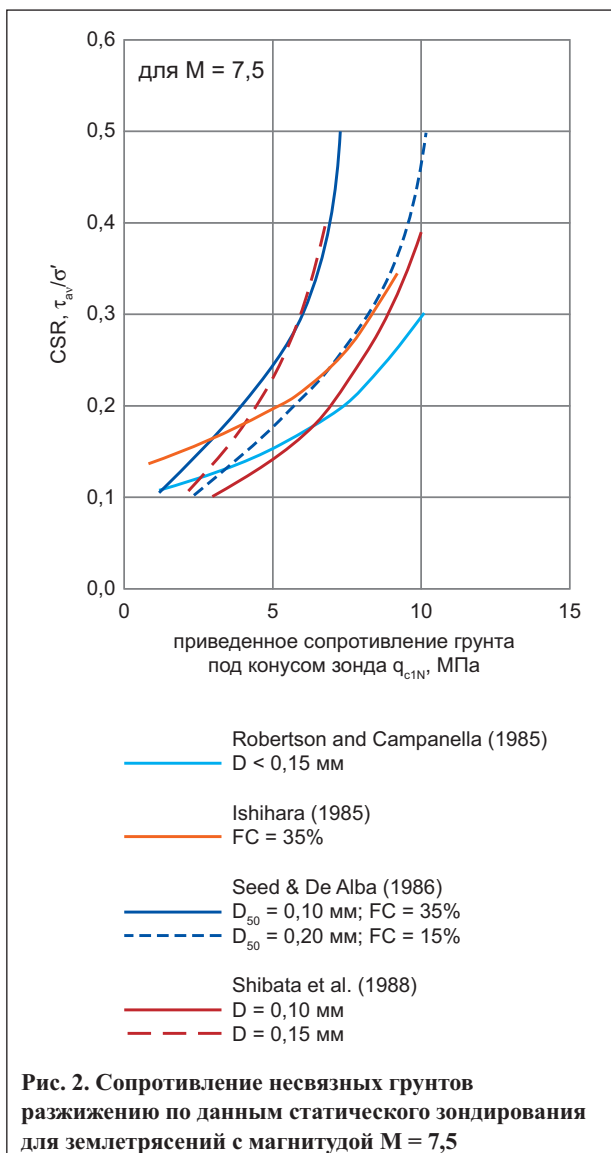


Таблица 2

Оценка разжижаемости песков по результатам динамического зондирования [14]		
$P^*$ , МПа		Вероятность разжижения песков при динамических нагрузках
среднее	миним.	
< 1,5	< 0,5	Большая вероятность разжижения (пески рыхлого сложения, сцепление практически отсутствует)
1,5–2,7	0,5–1,1	Разжижение возможно (пески рыхлые или средней плотности со слабо развитым сцеплением)
2,7–3,8	1,1–1,6	Вероятность разжижения невелика (пески средней плотности с развитым сцеплением)
> 3,8	> 1,6	Разжижение песков практически невозможно (пески плотные и средней плотности с хорошо развитым сцеплением)

\*  $P$  — условное динамическое сопротивление грунта погружению зонда.



свазабивной установки Беккера [14], получивший название «Беккер-пенетрация». Эти испытания заключаются в погружении в грунт трубы с двойной стенкой с наружным диаметром 16,8 см ударами дизель-молота. Внутренняя стенка трубы вблизи ее нижнего конца перфорирована, и мощный компрессор нагнетает воздух в зазор между стенками. Воздушная струя, вырываясь вверх по стволу инструмента, выносит и частицы грунта (даже гравийного размера) в специальную камеру. При этом измеряется число ударов, погружающих колонну труб в толщу грунта на 30,5 см.

Для оценки разжижаемости грунта по результатам Беккер-пенетрации (BPT) используются те же диаграммы Г.Б. Сида [24], что и при стандартной пенетрации, после перевода значений  $N_{BPT}$  в эквивалентные величины  $N_{SPT}$  по корреляционной зависимости из работы [14] (где  $N_{BPT}$ ,  $N_{SPT}$  — количество ударов молота стандартной массы при его падении со стандартной высоты, необходимое для погружения зонда на глубину 30 см при использовании методов BPT и SPT соответственно; на рис. 1 параметр  $N_{SPT}$  обозначен  $(N_1)_{60}$ , как в работе [24]).

Вопрос о надежности корреляционной связи между данными стандартной и Беккер-пенетрации, на которой основаны все дальнейшие расчеты, остается открытым, что вносит неопределенность в оценку потенциала разжижения грунтов по результатам BPT. Корреляция проводится по результатам обоих методов испытаний в одинаковых условиях (там, где состав и строение толщи допускают применение SPT). Но неизвестно, справедливы ли ее результаты для грунтов со значительной примесью гравийно-галечного материала и просто грубообломочных отложений, поскольку в таких условиях нельзя провести стандартную пенетрацию.

В отечественной практике разжижаемость песчаных грунтов допускается оценивать по результатам динамического зондирования в соответствии с приложением «И» части I СП 11-105-97 [8] (табл. 2). Очевидным недостатком этого документа является отсутствие учета величины сейсмического воздействия. Таким образом, и без того чисто качественная оценка возможности разжижения дается «вообще» (без привязки к сейсмическому событию определенной величины), что принципиально неправильно, поскольку противоречит самой сущности инженерной оценки явлений. Кроме того, динамическое зондирование все меньше применяется в составе инженерных изысканий в России, на что есть свои причины, рассмотрение которых выходит за рамки данной работы.

В начале 80-х гг. XX в. в связи с расширением возможностей статического зондирования (CPT) за счет, во-первых, появления пьезоконусных инструментов с измерением порового давления в процессе пенетрации и, во-вторых, разработки ряда эмпирических зависимостей для определения показателей физических и физико-механических свойств грунтов по данным этого метода исследований возникло представление о возможности применения CPT также и для полевой оценки потенциала сейсмического разжижения грунтов. Несмотря на то что при статическом зондировании никакого собственно динамического воздействия на грунт не оказывается, этот подход оправдывался двумя обстоятельствами: (1) чрезвычайно широким использованием данного метода во всем мире; (2) очевидной



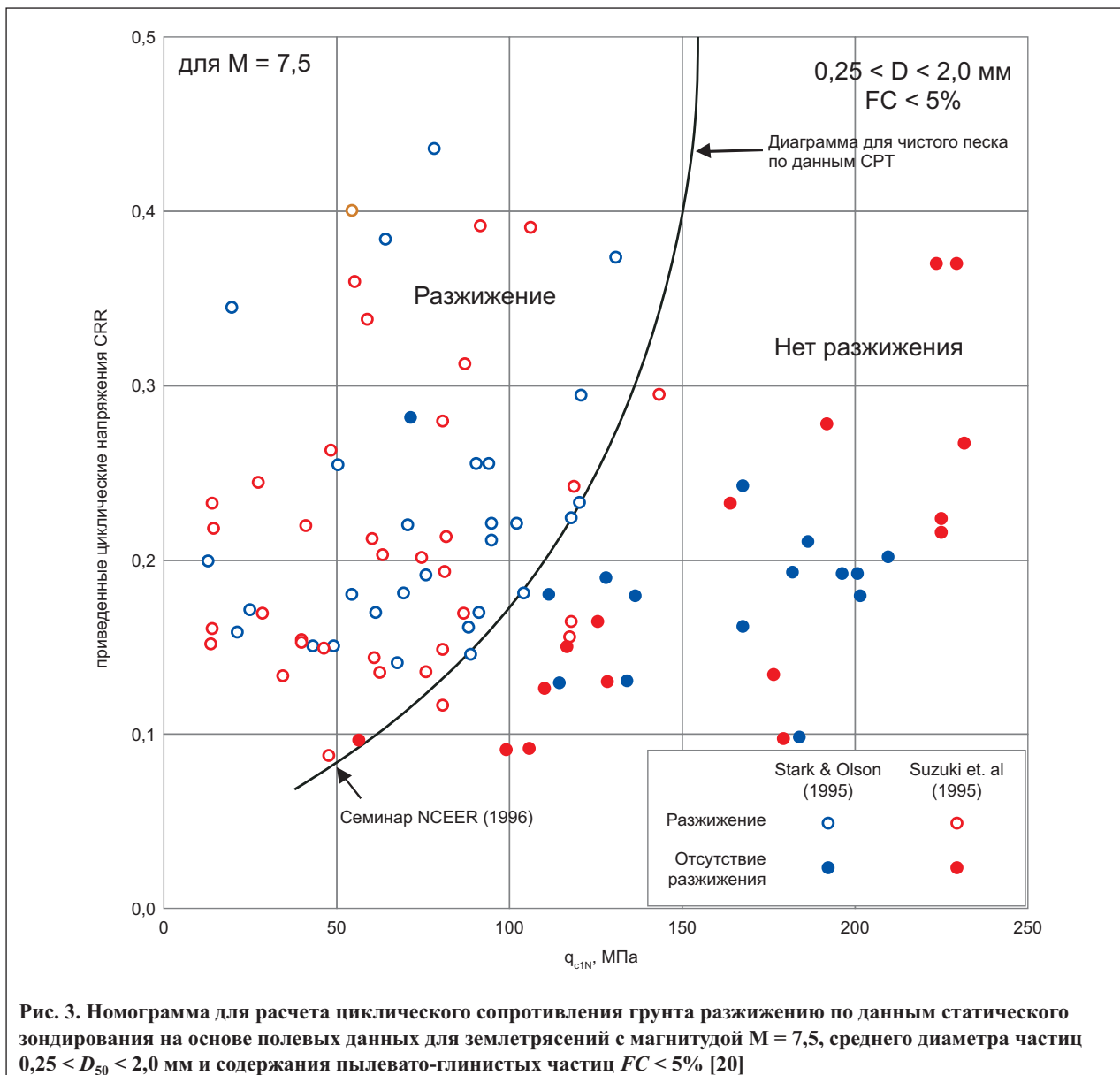
аналогией определения механических свойств грунтов при забивке и при вдавливании конусного или трубчатого зонда. То есть, поскольку в своей основе сопротивление грунта разрушению как при проникновении зонда, так и при сейсмическом воздействии определяется прочностью его структурных связей, существует физическая основа для оценки сопротивления грунта разжижению по его противодействию внедрению зонда при обязательном учете изменения порового давления. В основу этой оценки положена аналогия с описанной выше методикой определения потенциала сейсмического разжижения песков по данным стандартной пенетрации [24] на базе фактически наблюдавшихся случаев разжижения песков или его отсутствия при сильных инструментально зафиксированных землетрясениях в историческом прошлом.

В результате вскоре после появления работ Г.Б. Сиды с соавторами [14, 24] П. Робертсоном и Р. Кампанеллой [18] были предложены аналогичные корреляционные номограммы для определения сопротивления чистых и пылеватых песков разжижению по величине приведенного сопротивления грунта под конусом зонда при статическом зондировании ( $q_{c1N}$ ).

Близкие к ним диаграммы (рис. 2) разработали и другие авторы [15, 21, 25].

Впоследствии появилось много дополнительных данных по использованию статического зондирования для оценки разжижаемости грунтов, которые расширили исходную базу данных и показали, что предложенные разными авторами номограммы хорошо согласуются с реальным поведением чистых песков в массивах. В соответствии с рекомендациями рабочего совещания экспертов в Национальном центре исследований по сейсмостойкому проектированию США (NCEER) диаграмма П. Робертсона и Р. Кампанеллы [18] для чистых песков была немного модифицирована (рис. 3). Данные полевых испытаний и наблюдений, положенные в ее основу, были получены для чистых голоценовых песков, субгоризонтальной поверхности массива, магнитуды землетрясения 7,5, глубины залегания грунтов от 1 до 15 м (в 84% случаев — менее 10 м) и нормативных значений  $q_{c1N}$  для слоев, испытавших циклическое разжижение.

Впоследствии были также разработаны аналогичные корреляционные зависимости [26] для различных по гранулометрическому составу песчаных грунтов,



основанные на содержании частиц мельче 0,074 мм и среднем диаметре частиц  $D_{50}$ . На основе собранной обширной базы данных были предложены поправки на содержание пылевато-глинистых частиц ( $FC$ , %) для получения приведенного сопротивления грунта под конусом зонда ( $q_{cIN}$ ), эквивалентного таковому для чистого песка, а также магнитудные масштабные факторы, расширяющие возможности оценки потенциала разжижения песков при землетрясениях разной магнитуды. Таким образом, общий массив данных, использованный для оценки разжижаемости по данным статического зондирования, сегодня превышает таковой для данных SPT, который использовался Г.Б. Сидом [17].

В современной практике после расчета  $q_{cIN}$  (эта величина используется для определения и других показателей свойств грунтов по результатам СРТ) процедура оценки разжижаемости грунта сводится к следующим операциям:

1) при необходимости величина  $q_{cIN}$  корректируется с учетом: (а) наличия тонких прослоев существенно разной жесткости; (б) наклона поверхности массива; (в) значительных природных напряжений (обычно при глубине более 25 м); (г) возраста отложений; (д) магнитуды ожидаемого толчка;

2) полученное итоговое значение  $q_{cIN}$  используется для расчета приведенного циклического сопротивления разжижению ( $CRR$ );

3) сопоставление последней величины с ожидаемой сейсмической нагрузкой позволяет рассчитать фактор устойчивости грунта к разжижению — потенциал разжижения грунта ( $F_L$ ).

Подробно методика определения потенциала сейсмического разжижения песков изложена в работах [2, 31]. Полевые исследования, выполненные авторами работы [13] на 19 площадках, показали, что надежность определения потенциала разжижения по данным статического зондирования пьезоконусом составляет не менее 85%. Исходя из этого за **критическое значение потенциала разжижения** следует принимать величину 1,15, а все дисперсные грунты целесообразно разделить на три категории: I — разжижаемые (при  $F_L \leq 1,15$ ); II — неразжижаемые (при  $F_L > 1,15$ ); III — возможно чувствительные к сейсмическим нагрузкам и требующие лабораторного изучения на образцах ненарушенного сложения. К последней категории относятся грунты, для которых в соответствии с современными представлениями  $F_L$  по данным статического зондирования не определяется (водонасыщенные пылеватые и глинистые грунты). Это деление создает основу для классифицирования дисперсных грунтов по сейсмической разжижаемости по результатам статического зондирования.

Следующим шагом на пути развития полевых методов оценки сейсмической разжижаемости грунтов стала разработка методики их локализации на основе скоростей поперечных волн ( $V_S$ ) по данным **сейсмического зондирования**. Этот подход привлекателен еще и тем, что определение  $V_S$  можно совмещать со статическим зондированием при использовании сейсмоконусного или сеймопьезоконусного инструмента. Критерии разжижаемости грунтов по данным полевых измерений  $V_S$  были предложены в работах [9, 10].

Использование скорости поперечных волн в качестве полевого индекса разжижаемости основано на том, что значения как  $V_S$ , так и  $CRR$  в значительной мере определяются величинами эффективных сжимающих напряжений, пористостью грунтов, историей их нагружения и геологическим возрастом отложений.

Использование  $V_S$  как критерия разжижаемости грунтов имеет определенные преимущества:

1) измерения  $V_S$  можно проводить в грунтах, которые сложно испытывать зондированием или образцы которых трудно отбирать (например, в гравийно-галечных отложениях), а также в местах, где нельзя проводить разведочные работы;

2)  $V_S$  — это важнейший показатель физико-механических свойств грунта, прямо связанный с его модулем сдвига при малых деформациях, который требуется для аналитической оценки реакции грунта на динамические воздействия и его взаимодействия с сооружением в условиях таких воздействий [31].

Основные недостатки использования  $V_S$  в качестве критерия разжижаемости грунтов таковы:

1)  $V_S$  измеряется при малых деформациях, тогда как возникновение избыточного порового давления и разжижение — это явления, связанные с гораздо более высоким уровнем деформаций;

2) сейсмическое зондирование не предусматривает опробования изучаемых грунтов, которое необходимо для контроля получаемых данных;

3) тонкие прослои грунтов, имеющих низкие скорости упругих волн и склонные к разжижению, могут оказаться невыявленными (однако обычно сейсмическое зондирование сопровождается статическим и его результаты контролируются с помощью результатов разведочного бурения и отчасти лабораторных испытаний, что позволяет повысить надежность получаемых данных).

Так же как и при обработке результатов статического зондирования, измеренные скорости поперечных волн нормируются относительно природного давления в соответствии со следующим выражением [16, 19, 28]:

$$V_{S1} = V_S \left( \frac{p_a}{\sigma_v} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где  $V_{S1}$  — скорость поперечных волн с учетом влияния природного давления, м/с;  $V_S$  — измеренная скорость поперечных волн, м/с;  $p_a$  — атмосферное давление, кПа.

Уравнение (4) предполагает постоянство коэффициента бокового давления покоя  $K_0$ , который составляет приблизительно 0,5 для участков с разжижающимися грунтами. Оно также предполагает, что скорость измерена в обоих направлениях колебаний частиц, что направление поляризации волн совпадает с направлениями главных напряжений и что одно из них — вертикальное [27].

Разные исследователи пытались установить связь между разжижаемостью несвязных грунтов (в терминах  $CRR$ ) и скоростью поперечных волн с учетом влияния природного давления для этих отложений. Полученные ими зависимости были проанализированы и обобщены [9] с привлечением расширенного полевого материала по 26 землетрясениям и более чем по 70 площадкам измерений. В результате была предложена следующая зависимость между  $CRR$  и  $V_{S1}$ :



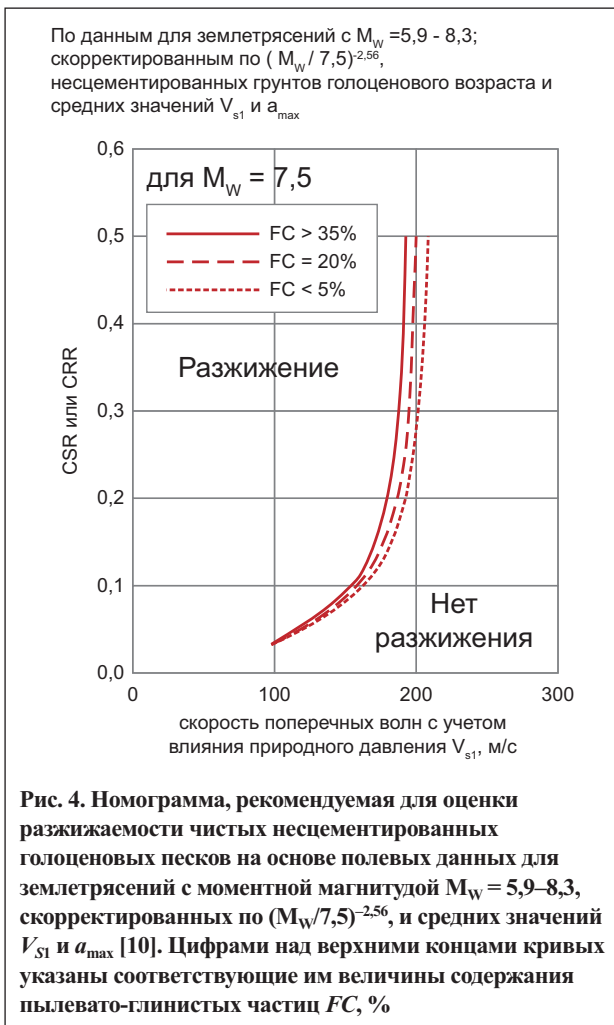
Таблица 3

Основные лабораторные методы динамических испытаний грунтов для оценки их разжижаемости	
Метод	Разновидности установок
Динамическое трехосное сжатие	электродинамические; электродневматические; электромеханические; электродневмогидравлические
Динамические испытания по схеме простого сдвига	с цилиндрическими образцами (NGI — Norwegian Geotechnical Institute type) с кубическими образцами (Cambridge University type)
Динамический крутильный сдвиг	с полыми образцами; со сплошными образцами
Динамический кольцевой сдвиг	с кольцевыми образцами; с дисковыми образцами

$$CRR = a \left( \frac{V_{SI}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{SI}^* - V_{SI}} - \frac{1}{V_{SI}^*} \right), \quad (5)$$

где  $V_{SI}^*$  — критическое для проявления разжижения значение скорректированной скорости поперечных волн  $V_{SI}$ , м/с;  $a, b$  — параметры кривой данной зависимости.

Первый член правой части уравнения (5) основан на модифицированной зависимости между  $CSR$  и  $V_{SI}$



для постоянной средней деформации сдвига (как предложено Р. Добри [31]), а второй описывает гиперболу при малых значениях для низких  $V_{SI}$  и при очень больших — при приближении  $V_{SI}$  к постоянной предельной величине  $V_{SI}^*$ .

Кривые « $CRR-V_{SI}$ », рекомендованные в работе [10] для практической оценки разжижаемости несцементированных голоценовых грунтов с различным содержанием пылевато-глинистых частиц применительно к землетрясениям с магнитудой 7,5, приведены на рис. 4. Для расчета  $CRR$  по значениям  $V_{SI}$  рекомендуется принимать  $a = 0,022$  и  $b = 2,8$ . Полагается, что величина  $V_{SI}^*$  изменяется линейно от 200 м/с для грунтов с  $FC = 35\%$  до 215 м/с для грунтов, содержащих не более 5% пылевато-глинистых частиц [31]. Рекомендуемые кривые проведены пунктиром при  $CRR > 0,35$ , что указывает на ограниченное количество фактических данных за пределами этого диапазона. Нижним пределом является точка ( $V_{SI} = 100$  м/с,  $CRR = 0,033$ ), поскольку отсутствуют данные для продолжения кривых в начало координат. Указанное минимальное значение  $CRR$  согласуется с таковым при  $q_{c1N} \approx 0$  по данным СРТ. Пересчет значений  $CRR$ , полученных по величинам скоростей поперечных волн, для заданного землетрясения следует осуществлять с применением магнитудных масштабных факторов [2].

Другими словами, после расчета  $CRR$  по данным измерений скоростей поперечных волн для определения разжижаемости грунтов по этому показателю можно перейти к вычислению фактора устойчивости грунта к разжижению ( $F_L$ ), а существование некоторых пороговых с точки зрения возможности разжижения песка значений скоростей поперечных волн открывает и возможность их использования в классифицировании грунтов по сейсмической разжижаемости.

Наиболее распространенные в современной практике **лабораторные методы** динамических испытаний грунтов для оценки их разжижаемости приведены в табл. 3. Основу этих методов составляет измерение реакции грунта в терминах величин возникающих в грунте деформаций и порового давления при условии корректного моделирования начального напряженного состояния и динамической нагрузки, эквивалентной в энергетическом отношении ожидаемой сейсмической.

Момент и сам факт достижения разжижения фиксируются по величине относительного порового давления  $PPR = \Delta u / \sigma_3 = 1$  (где  $\sigma_3$  — всестороннее сжимающее напряжение, кПа;  $\Delta u$  — изменение порового давления, кПа) или по прохождению траектории эффективных напряжений через начало координат ( $p' = 0$ ;  $q = 0$ , где  $q$  — максимальное касательное напряжение, кПа;  $p'$  — среднее эффективное напряжение, кПа) (рис. 5), что означает исчезновение в грунте эффективных напряжений и нулевое сопротивление сдвигу с передачей всех полных напряжений на поровый раствор.

Весьма важным представляется определить саму необходимость проведения динамических лабораторных испытаний грунтов для установления возможности их разжижения при заданных уровнях ожидаемых сейсмических воздействий, поскольку положительный ответ на этот вопрос означает дополнительные финансовые и временные затраты, а также необходимость отбора проб для этих исследований. И решение этого

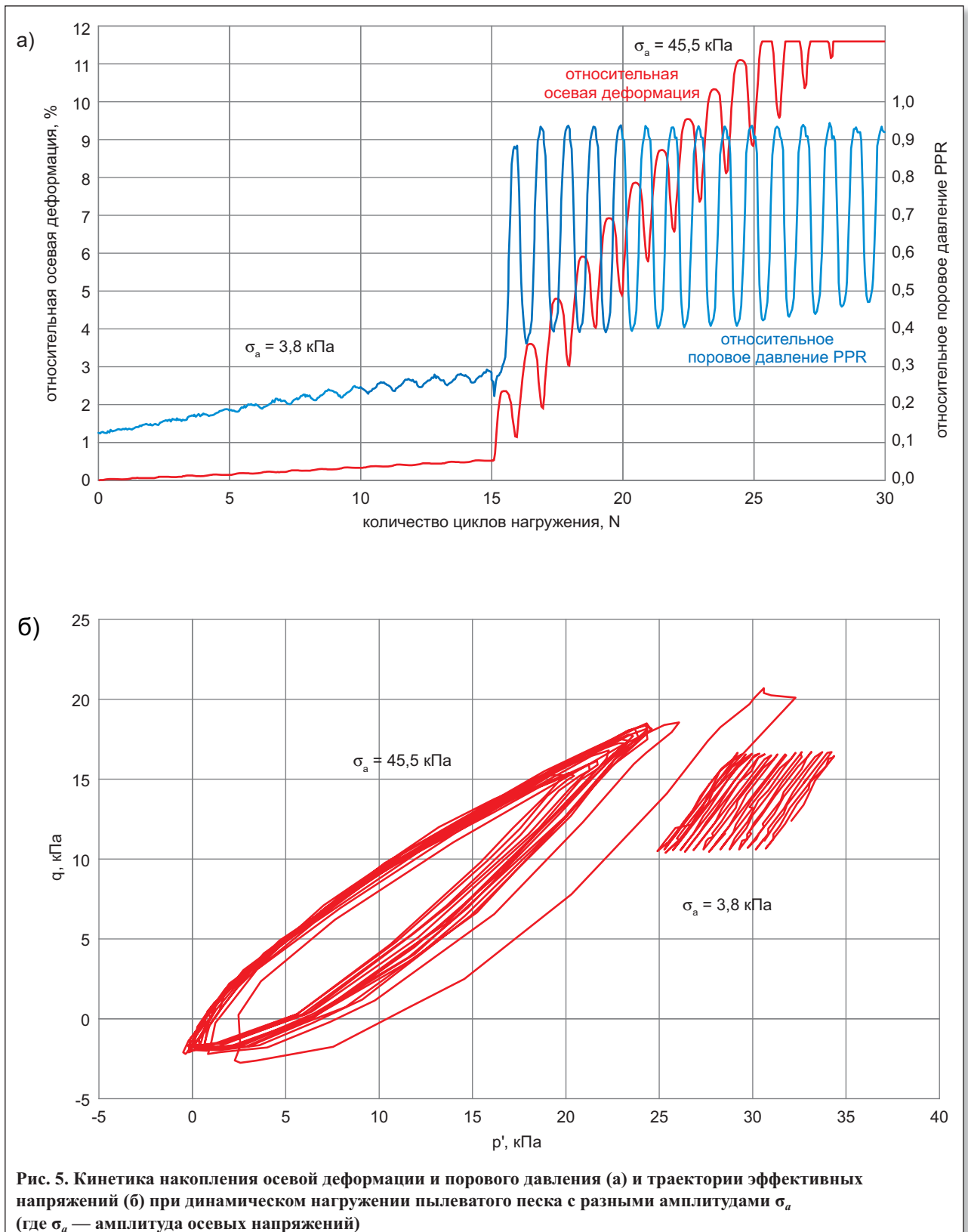
вопроса должно быть принято на основании данных полевых работ. Именно эту цель — отнесение грунтов к потенциально разжижаемым или неразжижаемым на основе данных стандартных методов инженерно-геологических изысканий — и преследует предлагаемая в данной работе классификация.

Когда же необходимы динамические испытания грунтов? При достаточной для разрушения структурных связей грунта энергии колебаний (т.е. при достаточно сильном сценарном землетрясении) разжижение

может происходить в водонасыщенных дисперсных грунтах среднеплейстоцен-голоценового возраста, проявляющих тенденцию к уплотнению при сдвиге (отрицательную дилатансию), при невозможности быстрой диссипации порового давления (отжатия поровой влаги из грунта).

К наиболее легко разжижаемым грунтам обычно относятся:

1) все слабосвязные грунты вышеуказанного возрастного диапазона в водонасыщенном состоянии (пы-



**Рис. 5.** Кинетика накопления осевой деформации и порового давления (а) и траектории эффективных напряжений (б) при динамическом нагружении пылеватого песка с разными амплитудами  $\sigma_a$  (где  $\sigma_a$  — амплитуда осевых напряжений)



Основные факторы, определяющие возможность разжижения грунтов [2]			
Категории и группы факторов	Параметры циклической нагрузки	Характеристики состава, состояния и свойств грунтов	Особенности строения массива грунтов
Общие	энергия воздействия; длительность сотрясений (число циклов воздействия); спектральный состав сейсмических волн; асимметрия цикла нагрузки	степень влажности; величина эффективных напряжений; коэффициент бокового давления покоя грунта	глубина залегания потенциально разжижаемого грунта; мощность слоя потенциально разжижаемого грунта; положение очага разжижения относительно склона; наличие подстилающих жестких грунтов
Специ- фиче- ские	для не- связных грунтов	-	степень плотности; размер, форма, морфология поверхности зерен; водопроницаемость
	для связ- ных грунтов	-	величина сцепления; тип структуры и микростроение; степень переуплотнения; физико-химическая активность; возраст отложений

леватые пески, супеси и легкие суглинки, в т.ч. увлажненные лессовые грунты, золы уноса и т.п.);

2) пески мелкие и средней крупности со степенью плотности  $I_D \leq 0,45$ ;

3) связные грунты, имеющие метастабильные структуры и низкую физико-химическую активность твердой компоненты (типа ледниково-морских «плавунных» глин).

Из этого краткого перечня видно, что лишь для части указанных разностей сегодня возможна оценка сейсмической разжижаемости в полевых условиях. Следовательно, для надежной идентификации потенциально разжижаемых разностей в разрезе конкретной территории в классификации необходимо опираться также и на опыт строительства и лабораторных исследований динамической неустойчивости грунтов. А этот опыт указывает прежде всего на то, что при оценке разжижаемости грунтов совершенно необходимо корректно учитывать целый ряд факторов, в значительной мере влияющих на возможность возникновения эффекта разжижения при землетрясениях и на его последствия для сооружений.

### **Факторы, определяющие возможность разжижения грунтов**

Наиболее важные из факторов, определяющих возможность разжижения грунтов, систематизированы в табл. 4.

Для классифицирования грунтов по сейсмической разжижаемости прежде всего следует принимать во внимание характеристики их состава, состояния и свойств, поскольку параметры сейсмической нагрузки определяются магнитудой, продолжительностью и другими особенностями ожидаемых для той или иной площадки сценарных землетрясений с заданным периодом повторяемости. Кроме того, поскольку, во-первых, при сейсмических воздействиях разжижение на-

блюдается преимущественно в песчаных грунтах, а во-вторых, методы полевой оценки разжижаемости связных дисперсных грунтов пока не разработаны, то обсуждаемая ниже классификация будет касаться исключительно песчаных грунтов.

Не все указанные в табл. 4 факторы, характеризующие состав, состояние и свойства песчаных грунтов, целесообразно использовать для классификационных целей.

Так, *степень влажности* не может быть классификационным критерием, поскольку разжижение возможно только в полностью водонасыщенных грунтах, а следовательно, классифицировать по сейсмической разжижаемости имеет смысл только водонасыщенные пески.

Используемое сегодня на практике подразделение песков по *степени плотности* совершенно бессмысленно и не основано ни на каких физических закономерностях, а само понятие степени плотности при современной методике определения пригодно только для сухих песков, ибо их уплотняемость во влажном или водонасыщенном состоянии совершенно иная. Физический смысл подразделение по плотности сложения имеет только относительно критической пористости, или «параметра состояния песков» ( $\Psi$ ), принятого в зарубежной практике. Однако их экспериментальное определение достаточно сложно и трудоемко для классификационных целей.

*Водопроницаемость* песчаных грунтов — безусловно, важный фактор разжижаемости, поскольку определяет темпы диссипации порового давления при сейсмическом воздействии, однако хорошо известно, что этот показатель достаточно надежно контролируется эффективным диаметром частиц ( $D_{10}$ ) и, следовательно, может быть соотнесен с гранулометрическим составом грунта.

Исследованиями Е.С. Кушнareвой [6] было показано, что с увеличением *коэффициента бокового давления покоя*  $K_0$  в диапазоне от 0,4 до 1,2 динамическая

устойчивость водонасыщенных песков разной плотности возрастает, причем вид этой зависимости несколько различен (по разбросу, степени влияния) для песков разной крупности. Вместе с тем авторы настоящей статьи сочли возможным не использовать этот показатель при классифицировании песков по сейсмической разжижаемости, поскольку в большинстве случаев разжижающиеся пески характеризуются коэффициентом бокового давления покоя в более узком диапазоне (0,5–0,7), сам этот показатель определяется достаточно сложно, а его значимость по сравнению с величиной эффективных напряжений и дисперсностью песка при этом ниже.

Таким образом, среди факторов, характеризующих состав, состояние и свойства песчаных грунтов, для классификационных целей первоочередное значение имеют их *гранулометрический состав (дисперсность)* и *величины эффективных напряжений*, что убедительно показано во многих отечественных [3, 4, 7] и зарубежных [5, 12, 23, 29 и др.] исследованиях.

Установлено, что вероятность сейсмического разжижения песков закономерно снижается с ростом *природных эффективных напряжений*. Вместе с тем в литературе отсутствуют точные указания на определенное пороговое значение напряжения, выше которого разжижение становится невозможным, поскольку эта величина зависит от типа песка и других факторов. Однако совершенно очевидно, что величина действующих эффективных напряжений определяющим образом связана с глубиной залегания потенциально разжижаемого слоя грунта. В связи с этим для целей классифицирования грунтов предлагается опираться на эту очевидную взаимосвязь и на имеющийся опыт полевых и лабораторных исследований сейсмической разжижаемости грунтов, залегающих на разной глубине.

Обширный опыт работ авторов в этой области на Сахалине, Черноморском побережье Кавказа и в Арктике показывает, что в большинстве случаев разжижаемые пески залегают на глубине не более 8–12 м, а пылеватые пески разжижаются при их залегании на глубине не более 20 м. Иллюстрацией этого могут служить диаграммы, приведенные на рис. 6, которые показывают изменения значений сейсмического ускорения на поверхности массива ( $PGA_{крит.}$ ), критических для возникновения эффекта разжижения грунтов на разной глубине и при разной магнитуде ожидаемых землетрясений. Они построены по результатам анализа сейсмической устойчивости грунтов в разрезах четвертичных отложений в северной части острова Сахалин. По таким диаграммам можно оценить возможность разжижения грунтов на заданной глубине ( $z$ , м) при заданной магнитуде ( $M$ ) (на рис. 6 приведены диаграммы для трех уровней магнитуд) и горизонтальном сейсмическом ускорении на поверхности массива ( $PGA$ ). Разжижение на заданной глубине возможно при  $PGA \geq PGA_{крит.}$  (где  $PGA_{крит.}$  — критическое, т.е. минимально необходимое, значение  $PGA$  для возникновения разжижения на той или иной глубине). С ростом магнитуды ожидаемого толчка диаграммы смещаются влево — в сторону меньших  $PGA$ . Это принципиально правильно, потому что эти диаграммы учитывают еще и увеличение длительности сотрясений (больше количество эквивалентных циклов воздействия) с ростом энергии землетрясения. Поэтому при его большей магнитуде для проявления разжижения

грунта при прочих равных условиях достаточно меньших  $PGA$ .

Из анализа приведенных диаграмм следует, что при магнитудах порядка 7,5 для разжижения песков в приповерхностных частях массива требуется возникновение колебаний с ускорениями не менее 0,22g (где  $g$  — ускорение свободного падения), а при толчках с магнитудой 6,5 — с ускорениями более 0,31g. Наиболее склонна к разжижению толща в интервале глубин 3,5–10,0 м, а с дальнейшим увеличением глубины до 15 м и более критические ускорения резко нарастают до значений, возможных лишь при исключительно сильных и редких сейсмических событиях.

Таким образом, за **пороговую глубину** возникновения сейсмического разжижения в песчаных грунтах, которая определяется, прежде всего, действующими сжимающими напряжениями, мы можем принять 20 м. При этом наибольшая вероятность разжижения песков характерна для глубины их залегания не более 10 м.

Е.С. Кушнарева [6] было убедительно показано, что, при прочих равных условиях, важнейшее значение для динамической устойчивости водонасыщенных песков имеет размер зерен преобладающей фракции и особенно содержание пылевато-глинистых частиц. Подчиненную роль играют окатанность зерен и наличие на них поверхностных пленок, а влияние неоднородности гранулометрического состава песков и их сортировки не является закономерным. Опыт исследования сейсмической разжижаемости песков и их динамической устойчивости вообще позволяет утверждать, что абсолютное большинство разжижаемых песков характеризуется высоким содержанием пылевато-глинистых частиц (5–33%). При этом относительно более высокая чувствительность к динамическим нагрузкам характерна для пылеватых песков по сравнению с более грубодисперсными разностями.

С позиций энергетики процесса динамического нагружения грунта естественной мерой его сейсмической устойчивости является суммарная величина энергии, рассеянная единицей объема грунта во всех циклах воздействия к моменту разжижения или достижения некоторой величины относительной деформации. Чем выше эта величина рассеянной энергии, тем более динамически устойчив грунт. Подробнее энергетический подход в динамике грунтов рассмотрен в работах [1, 30].

Как показывают исследования авторов (рис. 7, 8), энергоемкость деформирования песчаных грунтов во многом определяется соотношением песчаных и пылевато-глинистых фракций. При увеличении содержания в песчаном грунте частиц мельче 0,05 мм до 4–5% величина удельной рассеянной энергии резко снижается (иногда в несколько раз) (см. рис. 7). При дальнейшем росте содержания пылевато-глинистых частиц до 10–14% энергоемкость их динамического деформирования продолжает закономерно снижаться до некоторого значения, которое при продолжении увеличения количества этих частиц в грунте уже практически не изменяется (см. рис. 7, 8). Для пылеватых песков характерны и наибольшие, при прочих равных условиях, вертикальные осадки поверхности массива после разжижения.

Вертикальной сиреневой линией на рис. 8 выделен интервал увеличения содержания пылевато-глинистой фракции от 1 до 12–14%, в котором происходит сни-

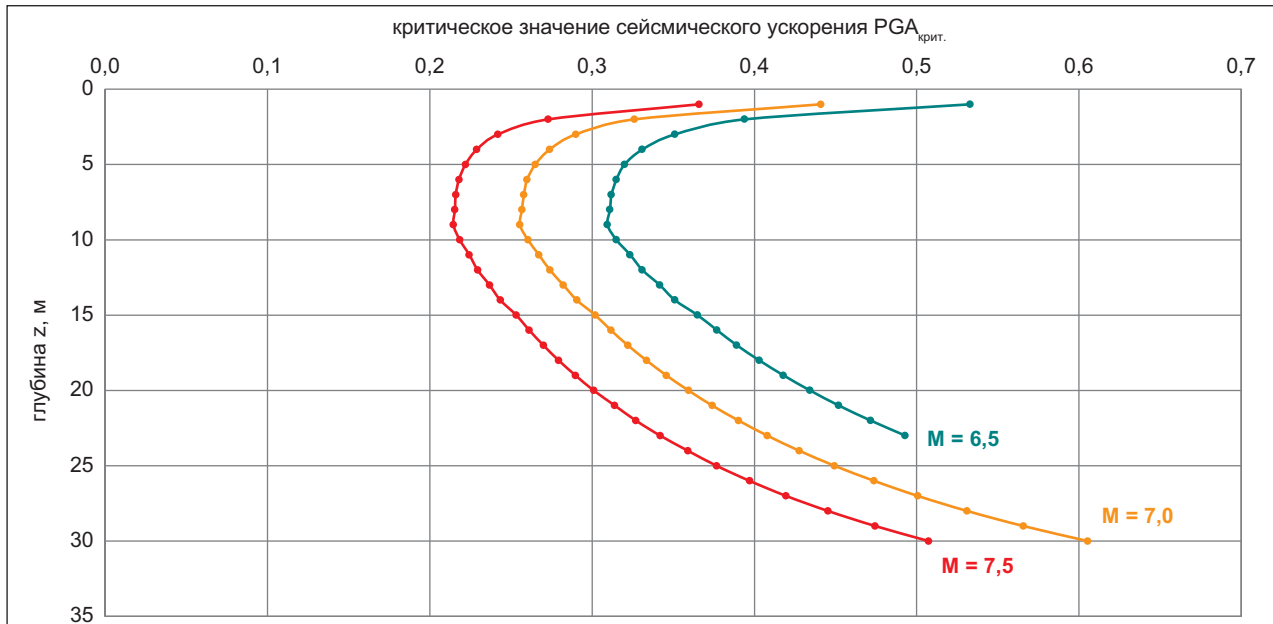


Рис. 6. Изменение критических значений сейсмического ускорения на поверхности ( $PGA_{крит.}$ ) для разжижения грунтов на разной глубине ( $z$ ) (Северный Сахалин)

жение сейсмической устойчивости песков. Таким образом, сейсмическая устойчивость песков снижается с увеличением содержания пылевато-глинистых частиц в интервале от 1 до 12–14%, а пески, содержащие большее их количество, характеризуются наименьшей динамической устойчивостью. При этом можно выделить два пороговых значения содержания частиц мельче 0,05 мм — 5 и 10%, что можно и нужно использовать для классифицирования песков по сейсмической разжижаемости.

### Классификация песков по сейсмической разжижаемости

В конечном итоге предлагаемый авторами принципиальный подход к классифицированию водонасыщенных песков по их сейсмической разжижаемости может быть суммирован в виде следующих основных положений.

1. Оценка разжижаемости на основе полевых данных возможна сегодня только для песков.
2. При классифицировании учитываются важнейшие факторы, влияющие на возможность разжижения песка:
  - величина сжимающих напряжений — через глубину залегания рассматриваемого слоя;
  - гранулометрический состав — через содержание пылевато-глинистых частиц (мельче 0,05 мм).
3. Основу классифицирования составляют данные общепринятых методов инженерно-геологической разведки:
  - условное сопротивление динамическому зондированию;
  - приведенное сопротивление статическому зондированию под наконечником зонда (с обязательным измерением порового давления при погружении);
  - скорость поперечных волн.

Последние две группы данных позволяют непосредственно рассчитать и потенциал разжижения грунта.

4. Отнесение грунта к той или иной категории по разжижаемости определяет необходимость дальнейших исследований и их содержание.

Исходя из этих позиций авторами предлагается классификация водонасыщенных песков по сейсмической разжижаемости, представленная в табл. 5. Она предназначена прежде всего для того, чтобы по результатам полевых работ:

- обоснованно выделить те геологические тела (слои, линзы, горизонты), для которых необходима экспе-

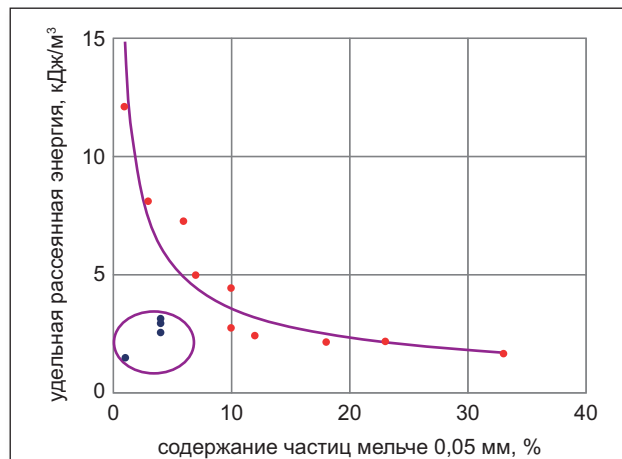


Рис. 7. Сравнительная характеристика устойчивости намывных песков (Ханты-Мансийский автономный округ) в водонасыщенном состоянии при циклическом воздействии: удельная рассеянная энергия на момент достижения 5%-ной осевой деформации в зависимости от содержания пылевато-глинистых частиц (мельче 0,05 мм). Разные формы и цвета маркеров обозначают места отбора исследованных намывных песков. Тонкой черной линией показан тренд изменения динамической устойчивости песков, выраженной через  $\Delta W$ , в зависимости от содержания  $FC$

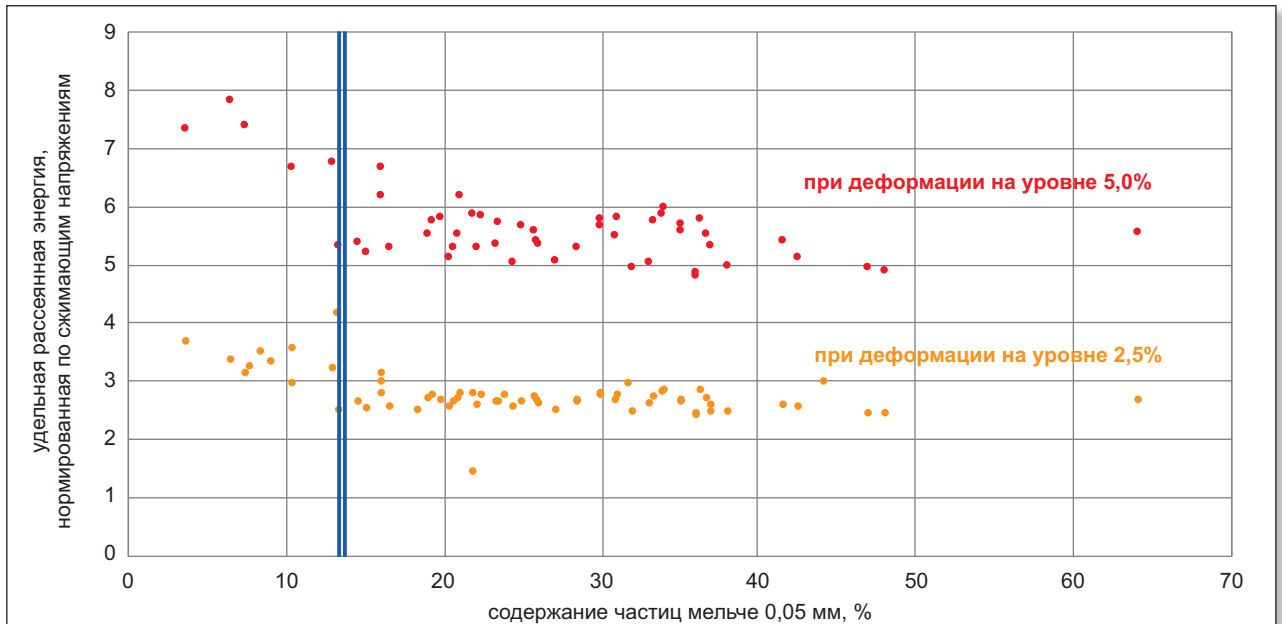


Рис. 8. Сравнительная характеристика устойчивости голоценовых песчаных грунтов (Имеретинская низменность, Краснодарский край) при динамическом воздействии. Удельная рассеянная энергия ( $\Delta W$ ) на момент достижения 2,5- и 5%-ной осевой деформации в зависимости от содержания пылевато-глинистых частиц.

риментальная оценка разжижаемости и возможных последствий разжижения;

- обеспечить отбор проб для этих исследований;
- обоснованно исключить из рассмотрения и дополнительного опробования неразжижаемые отложения;
- определить состав экспериментальных исследований.

Определение категории песков по разжижаемости позволяет принять следующие решения.

- При отнесении грунтов к категории *легко разжижаемых (пывунных)* следует полагать, что их разжижение неизбежно. В этом случае целесообразно провести инженерную оценку последствий разжи-


Таблица 5

#### Классификация водонасыщенных песчаных грунтов по разжижаемости при сейсмических воздействиях

Параметры*	Разновидности песков				
	Гравелистые	Крупные	Средней крупности	Мелкие	Пылеватые
<i>Легко разжижаемые (пывунные)</i>					
$FC$ , %	-	-	> 10	> 10	Не регламентируется
$z$ , м	-	-	< 12	< 12	< 12
$P_0$ , МПа	-	-	< 2,0	< 2,0	< 2,0
$V_S$ , м/с	-	-	< 215	< 200	< 200
$F_L$	-	-	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15
<i>Разжижаемые</i>					
$FC$ , %	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 5	Не регламентируется
$z$ , м	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
$P_0$ , МПа	2,0–5,0	2,0–5,0	2,0–5,0	2,0–5,0	2,0–5,0
$V_S$ , м/с	≤ 215	≤ 215	≤ 215	≤ 215	≤ 215
$F_L$	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15
<i>Практически неразжижаемые</i>					
$FC$ , %	< 5	< 5	< 5	< 5	Не регламентируется
$z$ , м	Не регламентируется				≥ 20
$P_0$ , МПа	> 5,0	> 5,0	> 5,0	> 5,0	> 5,0
$V_S$ , м/с	> 215	> 215	> 215	> 215	> 215
$F_L$	> 1,15	> 1,15	> 1,15	> 1,15	> 1,15

\*  $FC$  — содержание частиц мельче 0,05 мм;  $z$  — глубина залегания;  $P_0$  — условное сопротивление динамическому зондированию;  $V_S$  — скорость поперечных волн;  $F_L$  — потенциал разжижения по данным статического или сейсмического зондирования.



- жения с учетом особенностей строения массива и рельефа местности на основе ряда экспериментально определяемых показателей.
- Если грунты отнесены к категории *разжижаемых*, то возможность их разжижения при заданных параметрах землетрясений требует обязательной экспериментальной проверки.
  - При отнесении песков к категории *практически неразжижаемых* достаточно результатов полевых работ, а лабораторные динамические испытания проводить нецелесообразно.
  - Для *связных и слабосвязных* водонасыщенных грунтов в любом случае необходимо проведение лабораторных динамических испытаний. 

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. М.: Издательская группа URSS (Editorial URSS), 1999. 264 с.
2. Вознесенский Е.А., Коваленко В.Г., Кушнарёва Е.С., Фуникова В.В. Разжижение грунтов при циклических нагрузках. М.: Изд-во МГУ, 2005. 134 с.
3. Вознесенский Е.А., Кушнарёва Е.С. Оценка сейсмической устойчивости песчано-глинистых грунтов Нимфейской морской террасы (г. Анапа) // Инженерная геология. 2008. № 4. С. 46–52.
4. Вознесенский Е.А., Фуникова В.В., Кушнарёва Е.С., Проворов Ф.А. Основные факторы динамической устойчивости песчаных грунтов // Геоэкология. 2003. № 4. С. 335–345.
5. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: Изд-во НИО «Геореконструкция-Фундаментпроект». 2006. 383 с.
6. Кушнарёва Е.С. Устойчивость водонасыщенных песков при динамическом воздействии: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во МГУ, 2008. 27 с.
7. Кушнарёва Е.С., Вознесенский Е.А. О применимости концепции критической пористости при оценке динамической устойчивости песков // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2009. № 2. С. 53–61.
8. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ. М.: Госстрой России, 2000.
9. Andrus R.D., Stokoe K.H.II. Liquefaction resistance based on shear wave velocity // Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Buffalo, USA: NCEER, State University of New York at Buffalo, 1997. P. 89–128.
10. Andrus R.D., Stokoe K.H.II. Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2000. V. 126. № 11. P. 1015–1025.
11. ASTM D1586–11. Standard test method for penetration test and split-barrel sampling of soils. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM, 2011.
12. Castro G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands // Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, 1975. V. 101. № GT6. P. 55–569.
13. Gilstrap S.D., Youd T.L. CPT based liquefaction resistance analyses using case histories / Technical Report CEG-90-01. Provo, Utah: Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, 1998.
14. Harder L.F., Seed H.B. Determination of penetration resistance for coarse-grained soils using the Becker Hammer Drill / Report № 86/06. Berkeley: University of California, 1986.
15. Ishihara K. Stability of natural deposits during earthquakes: Theme lecture / Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, USA, 1985. V. 2. P. 321–376.
16. Kayen R.E., Mitchell J.K., Seed R.B. et al. Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data // Proceedings of the 4th Japan — U.S. Workshop on Earthquake-Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction. USA: NCEER, 1992. V. 1. P. 177–204.
17. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. Cone penetration testing in geotechnical practice. London — New York: E & FN Spon. 1997. 312 p.
18. Robertson P.K., Campanella R.G. Liquefaction potential of sands using the cone penetration test // Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 1985. V. 111. № 3. P. 384–403.
19. Robertson P.K., Woeller D.J., Finn W.D.L. Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading // Canadian Geotechnical Journal. 1992. V. 29. P. 686–695.
20. Robertson P.K., Wride C.E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test // Canadian Geotechnical Journal. 1998. V. 35. № 3. P. 442–459.
21. Seed H.B., De Alba P. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands // Proceedings of the ASCE Specialty Conference «Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering» (In Situ-86). Blacksburg, USA, 1986. P. 281–302.
22. Seed H.B., Idriss I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, 1971. V. 97. № SM9. P. 1249–1273.
23. Seed H.B., Lee K.L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, 1966. V. 92. № SM6. P. 105–134.
24. Seed H.B., Tokimatsu K., Harder L.F., Chung R. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations // Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 1985. V. 121. № 12. P. 856–869.
25. Shibata T., Teparaksa V. Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests // Soils and Foundations. 1988. V. 28. № 2. P. 49–60.
26. Stark T.D., Olson S.M. Liquefaction resistance using CPT and field case histories // Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 1995. V. 121. № 12. P. 856–869.
27. Stokoe K.H.II, Lee S.H.H., Knox D.P. Shear moduli measurements under true triaxial stresses // Advances in the art of testing under cyclic conditions. New York: ASCE, 1985. P. 166–185.
28. Sykora D.W. Creation of a data base of seismic shear wave velocities for correlation analysis / Geotechnical Laboratory Miscellaneous Paper GL-8/26. Vicksburg, MI, USA: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1987.
29. Vaid Y.P., Chern J.C. Mechanism of deformation during cyclic undrained loading of saturated sands // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1983. V. 2. № 2. P. 171–176.
30. Voznesensky E.A., Nordal S. Dynamic instability of clays: an energy approach // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1999. V. 18. № 2. P. 127–135.
31. Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D. et al. Liquefaction resistance of soils / Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001. V. 127. № 10. P. 817–833. Prevention and Reduction. Harbin, July 22–24, 2009. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2009. P. 98–103.