

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 624.131.382:429

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОСВЕЧИВАНИЕ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

© 2017 г. И. Г. Миндель, В. В. Севостьянов, Б. А. Трифионов, Н. А. Рагозин

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д.13, стр.2, Москва 101000 Россия. E-mail: igelab@mail.ru*

Поступила в редакцию 5.04.2016 г.

Излагается опыт изучения свойств грунтов в основании существующих зданий и сооружений методами сейсмического просвечивания. Оценивается степень изменения свойств грунтов в основании зданий относительно их свойств до начала строительства. Сведения об измененных свойствах грунтов в основании зданий позволяют уточнять характеристики сейсмических воздействий, первоначально назначенные на естественных грунтах.

Ключевые слова: сейсмическое просвечивание, сейсмические свойства грунтов, искусственные грунтовые основания, изменение свойств во времени.

В практике инженерных изысканий часто возникают задачи уточнения свойств грунтов в основании существующих зданий и сооружений в связи с их реконструкцией, изменением окружающей среды, при аварийных ситуациях и т.д. В большинстве случаев контакт с грунтами под фундаментами сооружений затруднен или вообще невозможен. В таких условиях наиболее эффективным представляется использование метода сейсмического просвечивания массива грунтов в основании сооружения. Правда, для успешной реализации сейсмического просвечивания требуется бурение скважин (хотя бы одной) вне контуров здания или сооружения.

В статье излагается опыт и приводятся примеры определения состояния и свойств грунтов в основании зданий и сооружений, как правило, при сейсмическом микрорайонировании, в том числе ответственных сооружений, частично ранее рассмотренные в [2, 3].

Наиболее надежные и эффективные способы детального изучения грунтов основания под фундаментами существующего здания методом сейсмического просвечивания требуют бурения скважин по периметру такого здания, что сопряжено с существенными затратами и на практике реализуется в тех случаях, когда необходимо обеспечить безопасность его дальнейшей эксплуатации в связи с реконструкцией или по другим причинам.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

Особенности изучения свойств грунтов под фундаментами существующего здания с применением методов сейсмического просвечивания проще проиллюстрировать на конкретном примере. На рис. 1 приведена схема расположения относительно контуров здания скважин, пробуренных и оборудованных специально для проведения сейсморазведочных исследований. Здание протягивается вдоль длинной оси на 230 м, вдоль короткой – от 45 до 50 м. Конфигурация плиты фундамента сложная: наибольшее заглубление от поверхности достигает почти 10 м, в некоторой части – около 4 м, наименьшее заглубление – около 1 м. Наиболее заглубленная часть фундамента опирается на естественные суглинки, в остальных

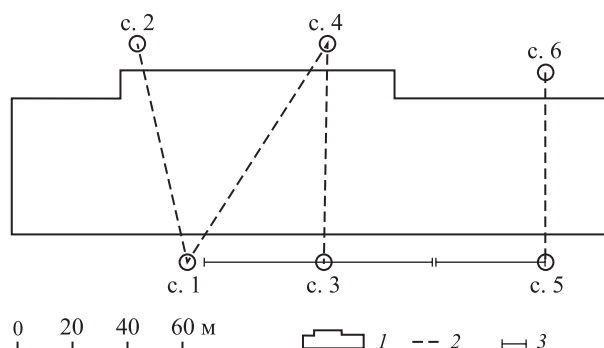


Рис. 1. Схема расположения оборудованных для МСП скважин и наземных профилей вне контура здания: 1 – контур здания, 2 – линии МСП, 3 – наземные профили.

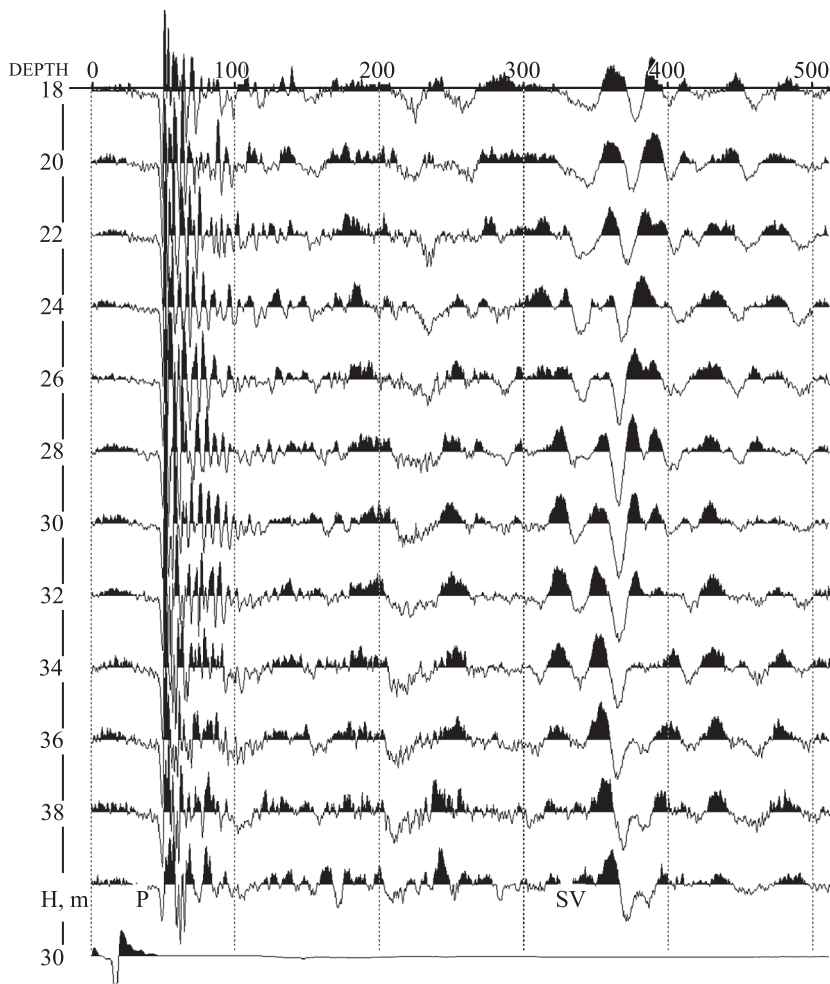


Рис. 2. Сейсмограмма МСП грунтов под фундаментом здания между скважинами с. 5 и с. 6 (см. рис. 1). Интервал записи в скважине с. 5 18–38 м, источник (воздушная пушка) в скважине с. 6 на глубине 30 м, расстояние между скважинами 66 м.

частях – на насыпные грунты мощностью от 2 до 6 м. Геологическое строение площадки расположения здания (снизу вверх): на глубине около 60 м от поверхности залегают трещиноватые гнейсы, перекрытые толщей коры выветривания (элювиальные суглинки, супеси, дресвяно-щебенистый грунт) общей мощностью до 30–35 м; выше встречены терригенно-осадочные породы верхней юры (J_2), представленные глинами с прослоями песчаников и алевритами мощностью 16–18 м; верхняя часть разреза сложена аллювиально-делювиальными грунтами (*adQ*) – суглинки с прослоями и линзами супесей мощностью от 6 до 12 м. Грунтовые воды в условиях работы дренажных систем в период проведения исследований залежали на глубинах 6–10 м от поверхности.

Межскважинное сейсмическое просвечивание (МСП) осуществлялось между двумя парами 60-метровых скважин с обсадкой из пластиковых труб. В качестве скважного источника колебаний

использована пневмопушка. Пневмоисточник представляет собой камеру объемом 0.5 л, в которую нагнетается сжатый воздух из баллонов. При достижении в камере давления до 70 атм с пульта управления подается сигнал, при этом происходит выхлоп газа в водную среду, заполняющую скважину. Создаваемый пневмопушкой импульс, служащий источником упругих колебаний, проходит через грунтовую среду и принимается в наблюдательной скважине. Источник перемещался вдоль ствола скважины через 2 м. Прием колебаний в наблюдательной скважине осуществлялся 2-компонентным зондом с интервалом между точками приема по вертикали через 1–2 м. Наблюдения в 60-метровых скважинах при длине приемного зонда 23 м проводились с учетом перекрытия интервалов при нескольких спуско-подъемных операциях. В качестве регистрирующей аппаратуры использована цифровая сейсморазведочная станция BISON-9024 (США) с накоплением сигналов и частотным диапазоном 2–2000 Гц.

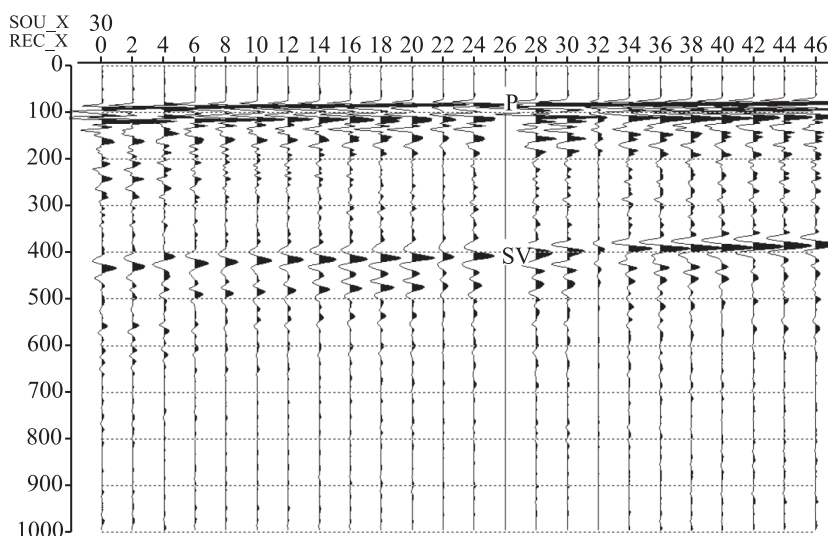


Рис. 3. Сейсмограмма просвечивания (торпедирование) массива грунтов под фундаментом. Наземный профиль расположен вдоль длинной оси здания (канал 24 на скважине с. 2, канал 1 – в 46 м в сторону с. 5, см. рис. 1), источник (воздушная пушка) находится в скважине с. 4 на глубине 30 м на противоположной стороне здания.

В качестве одного из вариантов сейсмического просвечивания массива грунтов под фундаментом здания осуществлялось просвечивание между скважиной и земной поверхностью: скважина с источником располагалась по одну сторону здания, а принимающий наземный профиль – по другую сторону (см. рис. 1). Такая система наблюдений в технической литературе называется торпедированием. Простейшая обработка материалов сейсмического торпедирования заключается в расчете полярных диаграмм скорости (индикатрисс) в предположении о прямолинейном распространении волны от источника к приемнику (без учета возможных преломлений). Для более точной аппроксимации среды используют компьютерные программы, позволяющие учесть возможные изменения в направлении сейсмических лучей при наличии резких границ.

Следует отметить, что в большинстве случаев качество записей на наземном профиле при торпедировании лучше, чем при просвечивании между скважинами, что объясняется визуальным контролем качества контактов сейсмоприемников с поверхностью земли и за строгим соблюдением направленности осей их максимальной чувствительности (вертикальной или горизонтальной). В случае регистрации в скважине при МСП качество записи зависит от ряда факторов: конструкции и способов обустройства наблюдательной скважины; качества прижима приемников к стенке или обсадке скважины; наличия трубных волн и др.

На рис. 2 приведен пример сейсмограммы МСП грунтов под фундаментом здания между двумя скважинами, расположенными напротив друг друга по разные стороны здания. На рис. 3 показан пример сейсмограммы просвечивания (торпедирования) массива грунтов под фундаментом при расположении наземного профиля вдоль одной стороны здания и расположении источника колебаний на некоторой глубине в скважине, находящейся по другую сторону здания. Как видно на приведенных рисунках, волновое поле на сейсмограммах просвечивания при торпедировании чище и четче, чем при прямом просвечивании, особенно при вступлении поперечных волн.

На рис. 4 приведен пример индикатрисс скоростей P- и S-волн по результатам просвечивания грунтов под фундаментом здания между профилем на земной поверхности и скважиной, расположенных на противоположных сторонах здания (см. рис. 1). Источники в скважине с. 4 находились на глубинах 10 м от поверхности (просвечивание массива грунтов, прилегающих к плите фундамента) и 50 м (просвечивание массива грунтов, наиболее удаленного по глубине от фундамента при реализованной системе наблюдений). Как следует из рис. 4, в плане проявляется тенденция некоторого увеличения скоростей P- и S-волн в толще грунтов в направлении справа налево, наблюдаются существенные флуктуации в скоростях P-волн, что, вероятно, объясняется особенностями работы дренажной системы, и весьма плавные изменения скоростей S-волн в плане. С охватом более глубоких слоев толщи

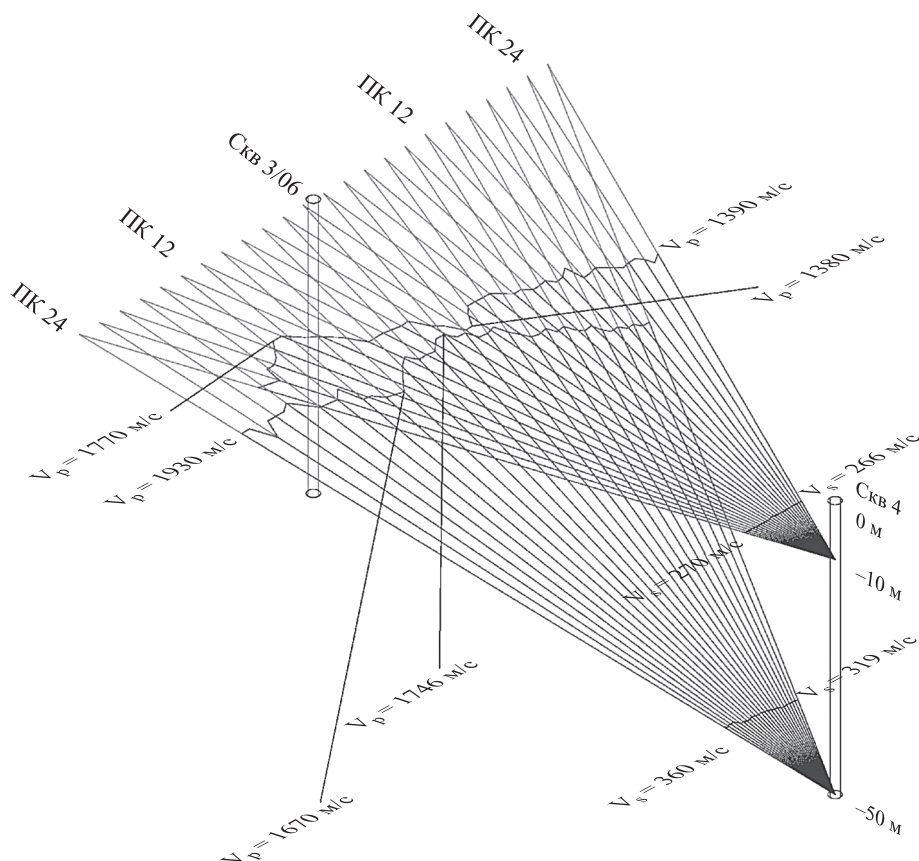


Рис. 4. Индикатрисы скоростей P- и S-волн, полученные при просвечивании массива пород между наземным профилем, расположенным вдоль длинной оси здания по одну сторону здания, и источниками колебаний в с. 4 на глубинах 10 и 50 м по другую сторону здания, расстояние между скважинами с. 3 и с. 4—75 м.

скорости S-волн увеличиваются от 266 до 360 м/с. Следует отметить, что отображенные на рис. 4 индикатрисы скоростей построены в предположении о распространении волн по прямым лучам от источника к приемникам, что вносит в результаты некоторую неопределенность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам МСП между парами скважин по четырем сечениям (см. рис. 1) были получены томографические отображения поля скоростей поперечных и продольных волн под фундаментом здания до глубины около 60 м от поверхности. При общем анализе результатов сейсмического просвечивания массива грунтов под фундаментом здания и вне его контуров обнаружилось лишь некоторое увеличение скоростей S-волн в насыпных грунтах под плитой фундамента (до 270–280 м/с) по сравнению со скоростями S-волн в этих грунтах вне контуров здания (250–260 м/с). В четвертичной и юрской толщах явного изменения скоростей S-волн под фундаментом здания и вне его в сторону увеличения

или уменьшения не отмечается (различия не превышают 10–15%, что можно отнести к пространственной неоднородности грунтов). Это дало возможность построить обобщенную сейсмогеологическую модель разреза под фундаментом здания в целом. В таблице приведены параметры сейсмического разреза под фундаментом здания по результатам сейсмического просвечивания между скважинами, расположенными по обе стороны здания вдоль его более длинной оси.

В 1999 и 2001 гг. изучались сейсмические характеристики грунтов под фундаментами двух старых блоков АЭС в Бушере (Иран) [3]. Здания блоков простояли около 25 лет. Их фундаменты были заглублены на 8–10 м от поверхности. До начала строительства в 1975 г. с помощью сейсмического просвечивания на площадке блока два между скважинами, расположенными на расстоянии 35 м друг от друга, с шагом по глубине 3 м, были определены скорости поперечных волн до глубины 60 м. Перед строительством были удалены верхние 4 м, сложенные известковыми породами (сиргок). Ниже залегает толща суглинков

Обобщенный сейсмический разрез (геолого-сейсмическая модель) по результатам МСП под фундаментом здания

Номер слоя	Наименование грунтов	Мощность, м	ρ , г/см ³	V_p , м/с	V_s , м/с
1	Насыпной грунт	3	2.20	1000	280
2	Суглинки легкие пылеватые, полутвердые, мягкопластичные с прослоями супеси	3	2.01	900	230
3	Суглинки легкие пылеватые от текучепластичных до мягкопластичных с прослоями супеси	5	1.97	1500	250
4	Суглинки легкие пылеватые с линзами тяжелого, полутвердые с линзами твердого и тугопластичного с линзами супесей	8	2.06	1500	270
Терригенно-осадочные грунты (J_2)					
5	Глина мягкая и тяжелая, твердая и полутвердая с прослоями песчаника и алеврит низкой прочности	16	2,07	1600	350
Грунты коры выветривания					
6	Элювиальный суглинок тяжелый с линзами легкого, пылеватый, твердый	21	2.12	1800	470
7	Элювиальный щебенистый грунт с суглинистым заполнителем	14	2.32	1900	590
8	Гнейс рыхлый, плотный, пониженной прочности и малопрочный	5	2.40	2000	800
9	Гнейс трещиноватый		2.50	2500	1100

и глин с подчиненными прослоями супесей и песков (морские отложения агаджарской свиты). Толща грунтов под фундаментами двух блоков в интервале глубин 10–100 м от поверхности была изучена методами сейсмического просвечивания между скважинами, расположенными на расстоянии 90 м по обе стороны блоков. Результаты исследования в виде графиков изменения динамического модуля сдвига (G) с глубиной приведены на рис. 5 (при исследованиях 1999 и 2001 гг. толща грунтов по сейсмическим свойствам была разделена на квазиоднородные слои). Как видно на рис. 5, наибольшие изменения в сторону увеличения значений G относительно их значений до начала строительства относятся примерно к 5-метровому слою грунта непосредственно под фундаментами тяжелых сооружений блоков (от 300 до 600 МПа). Ниже до глубины около 35 м величины G в грунтах под фундаментами везде в той или иной степени превышают их значения до начала строительства. В интервале глубин 35–80 м некоторые различия в поведении графиков G можно объяснить как пространственной неоднородностью грунтов, так и особенностями осреднений при выделении квазиоднородных слоев.

Следующий пример изучения свойств грунтов под фундаментом здания и вне его контуров методами МСП и ВСП относится к случаю, когда приповерхностная толща сложена четвертичными ледниковыми отложениями мощностью до 60 м. По гранулометрическому составу это в основном суглинки, иногда с включением дресвы и щебня. Модули общей деформации в инженерно-геологических элементах в верхней 30–40-метровой толще вне контуров здания составляют 15–35 МПа. Тип фундамента – плита на песчаной полушке мощностью до 2 м, она несколько приподнята над окружающим рельефом. По материалам ВСП, вне контуров здания скорости S -волн в преимущественно насыпных грунтах верхней части разреза мощностью 2–4 м составляют 130–200 м/с, в нижележащих суглинках мощностью до 7–10 м $V_s = 200–300$ м/с, средняя скорость толщи до глубин 15–20 м $V_s(H) = 230–250$ м/с. О распределении скоростей S -волн в грунтах под фундаментом здания можно судить по результатам сейсмического просвечивания между скважиной, расположенной вблизи торца здания так, что просвечиванием охватывался массив грунтов под частью фундаментной плиты (рис. 6). Результаты просвечивания толщи грунтов под фундаментом здания отображены

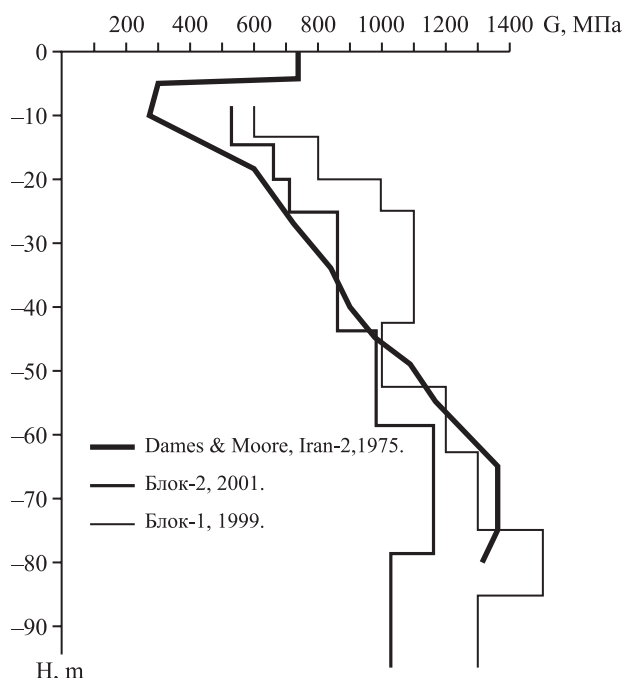


Рис. 5. Изменение динамического модуля сдвига (G) по данным МСП в грунтах основания старых реакторных блоков АЭС в Бушере (Иран) за 24–26 лет их существования (фундаменты блоков заглублены на 10 м от поверхности).

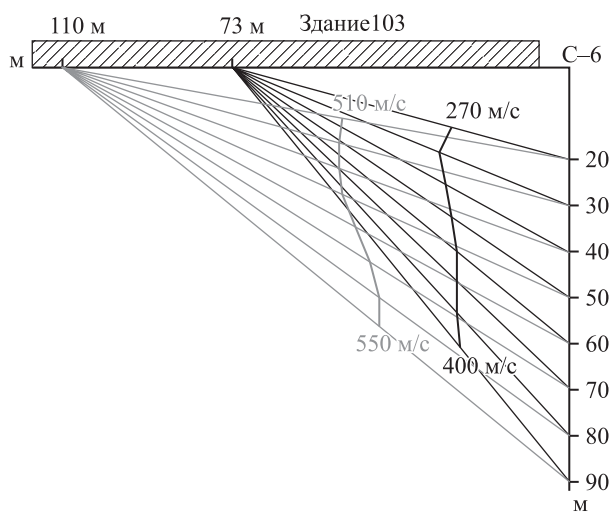


Рис. 6. Индикатриссы скоростей S -волн по данным сейсмического просвечивания (торпедирование) под фундаментом здания.

на рис. 6 в виде индикатрис скоростей S -волн при распространении их по лучам, охватывающим верхнюю часть разреза (источники на глубинах 20 и 30 м в скважине с. 6). Значения “лучевых” скоростей здесь оцениваются в 270–300 м/с. По сравнению со средними скоростями примерно в той же по мощности верхней части грунтовой толщи вне контуров здания их значения под фундаментом возросли всего на 15–20%. При охвате по данным

торпедирования толщи грунтов с глубин 40–90 м до подошвы фундаментной плиты “лучевые” скорости S -волн изменяются в зависимости от объема охвата в диапазоне от 400 до 550 м/с, что близко к значениям скоростей в моренных суглинках с прослоями песков в окрестностях здания в интервале глубин от 20 до 90 м.

На основании приведенных примеров изучения сейсмических свойств дисперсных грунтов под плитами фундаментов различных зданий можно заключить, что в зависимости от времени существования сооружений, уровня нагрузки на грунт и заглубления фундаментов улучшение сейсмических свойств, выражаемое в скоростях поперечных волн (или в динамических модулях сдвига G), как правило, не превышает 20–30% относительно первоначальных характеристик этих свойств до начала строительства.

Если принять во внимание, что при сейсмическом микрорайонировании для изменения сейсмичности площадки строительства на один балл по шкале MSK-64 в сторону увеличения или уменьшения требуется изменение сейсмической жесткости в 4 раза, то при опоре фундаментов на естественные дисперсные грунты учитывать возможные изменения свойств грунтов под фундаментами существующих зданий и сооружений при расчете возможных изменений уровня сейсмических воздействий с течением времени целесообразно только в особых случаях: при подтоплении, оттаивании многолетней мерзлоты и под влиянием других существенных факторов.

Обратимся к результатам исследования свайных оснований зданий и сооружений, устраиваемых, как правило, в слабых и относительно непрочных дисперсных грунтах.

Сейсмические характеристики искусственного массива, созданного свайным полем в водонасыщенных песчано-глинистых грунтах III категории на пойменной террасе р. Кубань в г. Краснодаре, изучались с применением методов ВСП и просвечивания по наклонным лучам [3]. Грунты здесь представлены переслаиванием суглинков от пылеватых до текучих и песками от пылеватых до средней плотности. В естественном состоянии вне поля свай грунты характеризуются плотностью $\rho = 1.95 \text{ г/см}^3$; скорости S -волн изменяются от 120 м/с в верхнем слое до 220 м/с на глубине 20–22 м; скорость, по данным ВСП, в этой толще составляет 150–170 м/с. Искусственный массив создан полем свай размером в плане $28 \times 35 \text{ м}$. Железобетонные 16-метровые сваи располагались в шахматном порядке по сетке $1.5 \times 1.5 \text{ м}$.

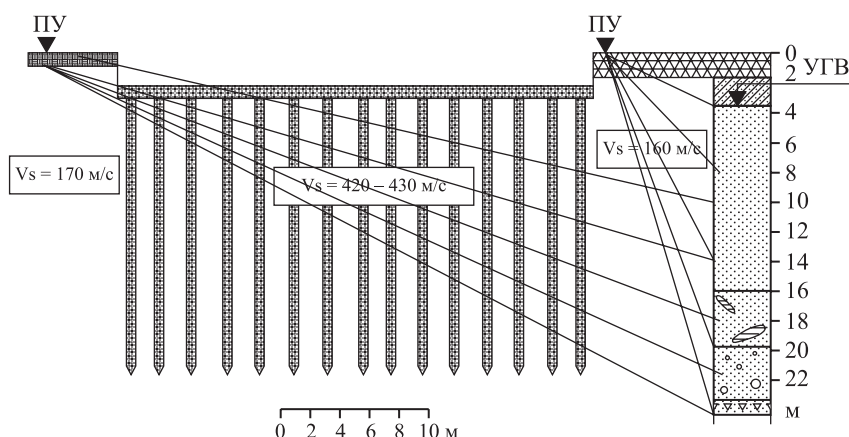


Рис. 7. Результаты изучения искусственного массива грунтов основания, образованного полем железобетонных свай в аллювиальных водонасыщенных песчано-глинистых породах (терраса р. Кубань).

Схема наблюдений и результаты просвечивания массива, созданного полем свай, показаны на рис. 7. Как следует из этого рисунка, среднее значение V_s в пределах свайного поля оценивается в 420–430 м/с. Расчетная плотность с учетом объема свай в искусственном основании составила 2.25 г/см³. Таким образом, сейсмическая жесткость в поперечных волнах в пределах поля свай увеличилась относительно жесткости естественных грунтов в 3 раза [3]. По данным регистрации микросейсм и колебаний от ударов падающего с высоты 4 м груза массой около 1 т, среднемаксимальные амплитуды колебаний на фундаменте, опирающемся на сваи, по сравнению с амплитудами колебаний на поверхности естественного грунта, уменьшились в 1.8–2 раза.

Аналогичные исследования были проведены для изучения характеристик свайного основания под реакторным отделением АЭС в г. Волгодонск [2]. Естественные грунты на площадке представлены лессовидными суглинками просадочными в зоне аэрации до глубины 4 м и общей мощностью 18 м, которые подстилаются плотными ергенинскими песками мощностью около 15 м. До начала строительства скорости S-волн в толще грунтов до глубины 22 м плавно изменялись от 170 м/с в верхнем 4-метровом слое до 360 м/с на глубинах 22–26 м. С целью предотвращения возможных просадок и недопустимых осадков грунтов под фундаментом были забиты сваи длиной 22 м по сетке 1.5 × 1.5 м. По данным сейсмического просвечивания массива основания, созданного полем свай, средняя скорость поперечных волн в таком искусственном массиве составила 600–630 м/с, т.е. значения V_s возросли в 2.5–3 раза по сравнению с теми, что фиксировались в естественных грунтах. Результаты исследований на

площадке первого блока Ростовской АЭС приведены на рис. 8 [2]. Следует отметить, что флуктуации значений скоростей Р-волн в пределах поля свай на разных уровнях по глубине не превышали 5–7% от среднего значения в ту и другую сторону, а скорости S-волн на разных глубинах отличались от средней для всего интервала еще меньше, что позволило присвоить эти средние

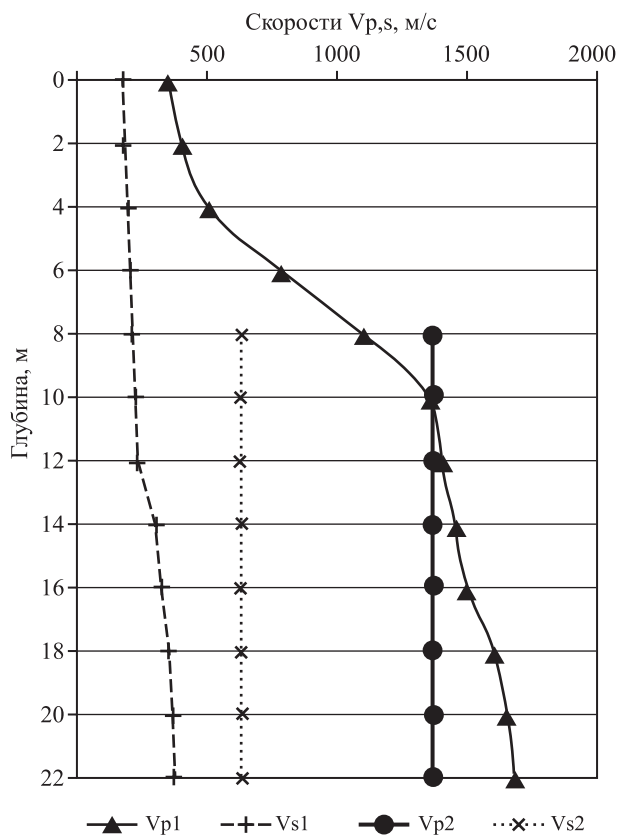


Рис. 8. Графики изменения с глубиной скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн в грунтах в массиве, образованном полем свай под фундаментом здания V_{p2} и V_{s2} , и вне контура поля свай [2].

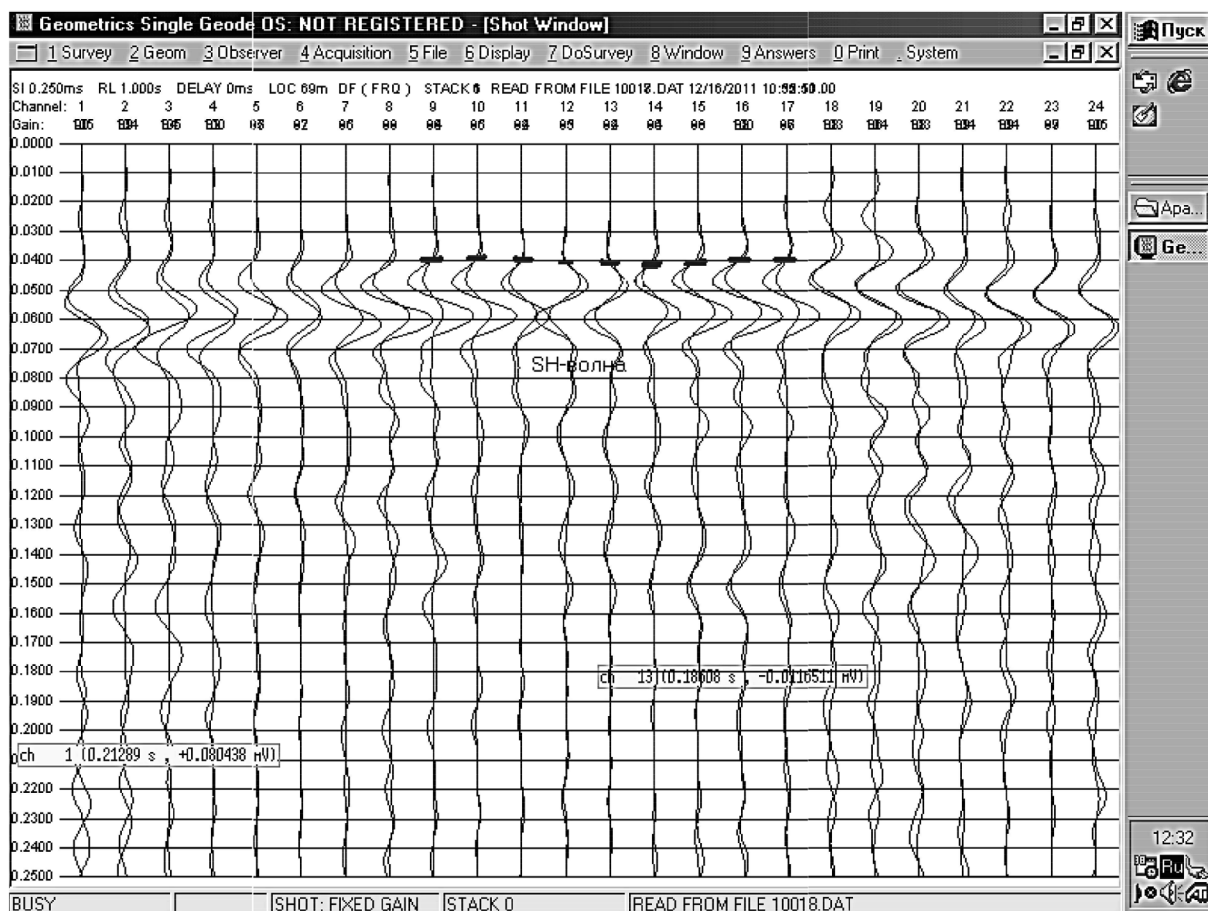


Рис. 9. Сейсмограмма неперодольного профилирования («просвечивания»). Сейсмическая «коса» расположена вдоль длинной оси здания № 3, пункт возбуждения колебаний расположен по другую сторону здания. Расстояние между пунктом удара и сейсмоприемниками на каналах 12 и 13—30 м.

значения всему массиву в пределах поля свай в целом по площадке. Обращает на себя внимание близость степени улучшения сейсмических характеристик оснований из забивных железобетонных свай по сравнению с первоначальными характеристиками естественных грунтов несколько различного литологического состава и состояния.

Следующий пример иллюстрирует попытку оценить влияние свайного поля на изменение сейсмических характеристик естественных грунтов путем использования методики неперодольного профилирования при расположении наземного профиля вдоль одного края поля и источника колебаний также на поверхности, но на противоположном крае свайного поля. Площадка строительства расположена в Адлерском районе г. Сочи и в геоморфологическом отношении приурочена к новочерноморской террасе. Общая мощность морских песчано-глинистых и гравийно-галечниковых отложений достигает 70–90 м. Верхняя часть разреза сложена преи-

мущественно глинистыми грунтами текучепластичной консистенции с прослоями обводненных песков, галечниковые грунты встречены на глубинах более 20 м. Забивные железобетонные сваи по проекту должны были опираться на плотные галечниковые грунты. По данным ВСП, средняя скорость S-волн в естественных грунтах в интервале глубин от поверхности до глубины около 15 м составляла 250 м/с. По данным неперодольного профилирования (условного сейсмического «просвечивания» массива с охватом свайного поля), скорость S-волн в таком массиве оценивается в 750 м/с (рис. 9). На качественном уровне и в этом случае изменение в сторону улучшения сейсмических условий после устройства свайного основания произошло примерно в 3 раза.

Результаты экспериментов на грунтах II–III категорий на площадке строительства со свайными основаниями близки к результатам расчетов по методу конечных элементов, выполненных в НИИОСП [1]. Так, в естественных грунтах

($\rho = 1.4 \text{ г/см}^3$, $V_s = 200 \text{ м/с}$ и $V_p = 498 \text{ м/с}$) моделировалось искусственное основание в виде грунтовой подушки или поля свай с $\rho = 1.17 \text{ г/см}^3$, $V_s = 398 \text{ м/с}$ и $V_p = 979 \text{ м/с}$. По данным расчетов, на поверхности искусственного основания при отношении его ширины к толщине замененного слоя, равном 1.5, отношение максимальных амплитуд колебаний на поверхности искусственного основания и поверхности естественного слоя составило 0.55, т.е. сейсмичность уменьшилась на 0.85 балла, что незначительно отличается от полученных значений приращений балльности относительно естественных грунтов в выше приведенных примерах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что в естественных дисперсных грунтах под плитами фундаментов различных зданий в зависимости от времени существования сооружений, уровня нагрузки на грунт и заглубления фундаментов улучшение сейсмических свойств, выражаемое в скоростях поперечных волн (или в динамических модулях сдвига G), как правило, не превышает 20–30% относительно первоначальных характеристик этих свойств до начала строительства.

Существенное улучшение сейсмических условий на площадках, сложенных дисперсными, в том числе водонасыщенными, грунтами (в 2 и более раз относительно первоначальных естественных условий в терминах сейсмической жесткости), может быть обеспечено устройством свайных оснований. К сожалению, ни в литературе, ни в наших исследованиях не встречались случаи изучения свайных оснований с различными конструкциями свай — буронабивных и других, что является актуальной задачей в связи с совершенствованием способов устройства свайных оснований в различных отраслях строительства, в том числе в сейсмически активных территориях.

CROSSHOLE SEISMIC TESTING OF SOILS IN THE FOUNDATION OF ENGINEERING STRUCTURES

I. G. Mindel, V. V. Sevostyanov, B. A. Trifonov, N. A. Ragozin

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str.2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: igelab@mail.ru

The paper covers the experience in the study of soil properties in the basement of existing buildings and engineering structures constructions by the method of cross-hole seismic testing. The changes in the properties of soils in the basement of buildings as compared to those prior to the construction are estimated. The changes in seismic properties of natural soils under the load produced by slab foundation and the considerable improvement in seismic conditions for the pile foundations is revealed. The data on the changing properties of soils in the basement of existing buildings allow us to specify the parameters of seismic impacts originally preset for natural ground prior to the construction.

Key words: cross-hole seismic testing, seismic properties of soils, artificial soil basement, change of properties in time.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев В.А., Курдюк А.Ю., Лиховцев В.М. Оценка влияния искусственной подготовки основания на интенсивность и спектральный состав колебаний // Тр. НИИОСП им. Герсеванова. М.: Стройиздат, 1986. Вып. 86. С. 103–113.
2. Миндель И.Г., Чумаченко А.Н. Геофизические методы в комплексе инженерных изысканий при строительстве подземных и заглубленных сооружений в городах и на промышленных площадках // Тр. Междунар. конф. “Горная геофизика”, 22–25 июня 1998, Санкт-Петербург. СПб.: ВНИМИ, С. 365–369.
3. Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Изменение сейсмических свойств грунтов в основании зданий и сооружений во времени, а также после их улучшения методами инженерной подготовки // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 10. С. 35–37.

REFERENCES

1. Il'ichev, V.A., Kurdyuk, A. Yu., Likhovtsev, V.M. *Otsenka vliyaniya iskusstvennoi podgotovki osnovaniya na intensivnost' i spektralnyi sostav kolebaniy* [Assessing influence of artificial preparation of foundation on the intensity and spectral composition of vibration]. *Trudy NIIOSP im. Gersevanova* [Proceedings of NIIOSP], Moscow, 1986, issue 86, pp. 103–113 (in Russian).
2. Mindel, I.G., Chumachenko, A.N. *Geofizicheskie metody v komplekse inzhenernykh izyskaniy pri stroitel'stve podzemnykh i zaglublennykh sooruzheniy v gorodakh i na promyshlennykh ploshchadkakh* [Geophysical methods in engineering survey for the construction of underground and deepened structures in cities and at industrial sites]. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii "Gornaya geofizika"* [Proc. International Conference “Mining geophysics”, June 22–25, 1998], St. Petersburg: VNIMI, pp. 365–369 (in Russian).
3. Mindel, I.G., Trifonov, B.A. *Izmenenie seismicheskikh svoystv gruntov v osnovanii zdaniy i sooruzheniy vo vremeni, a takzhe posle ikh uluchsheniya metodami inzhenernoi podgotovki* [Changes in seismic properties of soils in the basement of buildings and engineering structures in time and after their engineering improvement]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2003, no. 10, pp. 35–37 (in Russian).