

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2020 г. О. В. Павленко\*

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

*\*E-mail: olga@ifz.ru*

Поступила в редакцию 3.04.2019 г.

После доработки 24.01.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Локальные эффекты относятся к основным факторам, определяющим параметры колебаний поверхности при землетрясениях. Локальным эффектам, связанным с откликом грунта, всегда уделялось большое внимание в практике инженерной сейсмологии, поскольку большинство урбанизированных областей на земном шаре расположены в долинах рек, на мягких молодых осадочных отложениях. В речных долинах в сейсмоопасных районах расположены такие большие города мира как Токио, Осака, Кобе, Лос-Анжелес, Сан-Франциско, Сан-Сальвадор, Каракас, Лима, Богота, Катманду, Манила, Салоники, Мехико и другие. Распространенность и значимость этих эффектов стимулировали многочисленные инструментальные, теоретические и численные исследования, направленные на лучшее понимание и количественное оценивание этих эффектов. К настоящему времени в сейсмологии развиты методы надежной оценки этих эффектов. В статье описаны методы оценки локальных эффектов землетрясений, применявшиеся на ранних этапах развития сейсмологии, и их эволюция до современного уровня.

*Ключевые слова:* локальные эффекты, параметры колебаний поверхности, отклик грунта.

**DOI:** 10.31857/S0002333720040067

### ВВЕДЕНИЕ

Наряду с эффектами очага и пути распространения локальные эффекты определяют параметры колебаний земной поверхности при землетрясениях. Оценивание локальных эффектов землетрясений – важная составляющая исследований по оценке сейсмической опасности: знание вероятностных параметров колебаний поверхности необходимо для расчета спектров реакции, динамических напряжений и деформаций, которые могут вызвать разрушения построек, для оценивания возможности разжижения грунта.

Спектр колебаний поверхности  $Y$  в некотором пункте можно представить в виде произведения вклада источника  $E$ , пути распространения сейсмических волн  $P$  и локальных условий в точке приема  $G$ :

$$Y(M, R, f) = E(M, f)P(R, f)G(f), \quad (1)$$

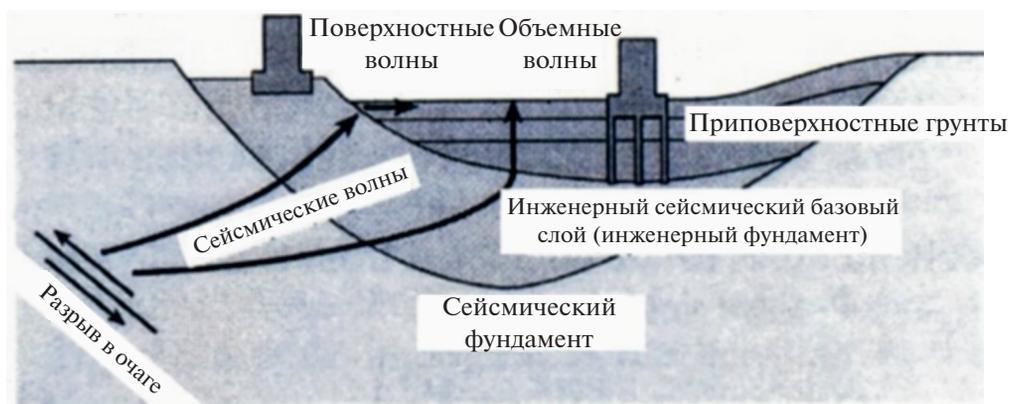
где:  $M$  – моментная магнитуда землетрясения;  $R$  – расстояние источник-приемник;  $f$  – частота. Это традиционный подход, используемый в оценке сейсмической опасности, когда требуется построить модель, описывающую спектр колебаний поверхности в данном пункте. Разделение спектра на компоненты “очаг”, “путь распро-

странения” и “локальные эффекты” позволяет модифицировать модель для учета различных ситуаций, либо для учета новой информации, касающейся частных аспектов модели [Boore, 2003].

Эффекты очага и пути распространения сейсмических волн представляют в виде функций магнитуды и расстояния; это региональные характеристики, которые можно оценить из имеющихся сейсмических записей данного региона. Локальные эффекты характеризуются большей пространственной изменчивостью, они могут заметно меняться в пределах небольших площадок, на базах в десятки метров.

К числу локальных эффектов землетрясений относят отклик грунта, эффекты поверхностной топографии и топографии внутренних границ (неоднородностей, включений, осадочных бассейнов и т.п.) (рис. 1).

Локальное усиление сейсмических волн в верхних слоях земной коры (до глубин ~20 км и более), и параметр ослабления сейсмических колебаний на высоких частотах каппа обычно относятся к эффектам пути распространения; эти эффекты учитываются при оценке сильных движений на скале, в основаниях грунтовых толщ.



**Рис. 1.** Схема, показывающая распространение сейсмических волн из очага землетрясения к земной поверхности. Рефракция сейсмических волн приводит к почти вертикальному распространению волн в приповерхностных грунтах (из работы [Yoshida, Iai, 1998]).

Наблюдения показывают, что приповерхностные грунты существенно влияют на формы и спектры распространяющихся волн. Сейсмические волны пробегают из очагов землетрясений десятки и сотни километров в кристаллических породах фундамента и лишь метры в грунтовых слоях, но часто именно грунты определяют характер колебаний на поверхности [Павленко, 2009].

Рисунок 2 иллюстрирует преобразования сейсмических волн в грунтовых слоях. Резонансные эффекты в верхних ~10 м более слабых грунтов вызвали усиление колебаний, увеличение их продолжительности и смещение преобладающих частот колебаний в низкочастотную область.

Корректная оценка локальных эффектов землетрясений — необходимое условие получения корректных оценок сейсмической опасности. Рассмотрим развитие методов оценки локальных эффектов в исторической перспективе, с начала сейсмических наблюдений до наших дней.

### ДО 1970-х ГОДОВ

Сейсмологи понимали важность локальных эффектов землетрясений и пытались оценить их влияние методами, основанными на регистрации микросейсм или слабых землетрясений, а также методом сейсмических жесткостей, внося поправки за грунтовые условия в оценки параметров сильных движений. Сейсмическая опасность территорий характеризовалась параметрами сейсмической интенсивности, пиковых ускорений и жесткостей, спектрами реакции. Близкие подходы применялись в разных странах; нормы строительства в сейсмических районах включали 3–4 категории грунта, для которых задавались спектры реакции.

О влиянии локальных геологических и грунтовых условий на интенсивность колебаний поверхности при землетрясениях было известно еще с начала 19-го века. Отмечалось, что здания, построенные на скальных породах, не испытывали такого сильного сейсмического воздействия, как здания, фундаменты которых заложены в грунт и не достигают коренных пород. Влияние локальных геологических условий на характер разрушений наблюдалось при землетрясениях 1857 г. в Базиликате (Италия) [Mallet, 1862] и 1906 г. в Сан-Франциско [Reid, 1910]. Б. Гутенберг развивал идеи зависящих от места коэффициентов усиления, рассчитываемых по записям микросейсм в местах с различными приповерхностными грунтами [Gutenberg, 1957].

Для оценки влияния грунтов на балльность землетрясений (сейсмическую интенсивность, выраженную в баллах) С.В. Медведевым с коллегами собраны материалы экспедиционных обследований сильных землетрясений как в России, так и за рубежом. Наблюдения относились к разнообразным условиям и сочетаниям грунтов. Согласно полученной С.В. Медведевым эмпирической зависимости при уменьшении скорости продольных волн в верхней части грунта в 4 раза землетрясения проявляются на 1 балл сильнее. Количество разрушений на песках и глинах возрастает с увеличением толщины их слоя.

На основе эмпирических данных о связи сейсмической жесткости грунтов и степени повреждения зданий при землетрясениях С.В. Медведев разработал метод сейсмических жесткостей [Медведев, 1962]. Анализ поврежденных зданий, возведенных на прочных неветерельных скальных породах и на слабых грунтах при низком уровне грунтовых вод позволил оценить приращение балльности на слабых грунтах в 2–3 балла по шкале MSK-64 (т.е. в 4–8 раз по ускорениям) по от-

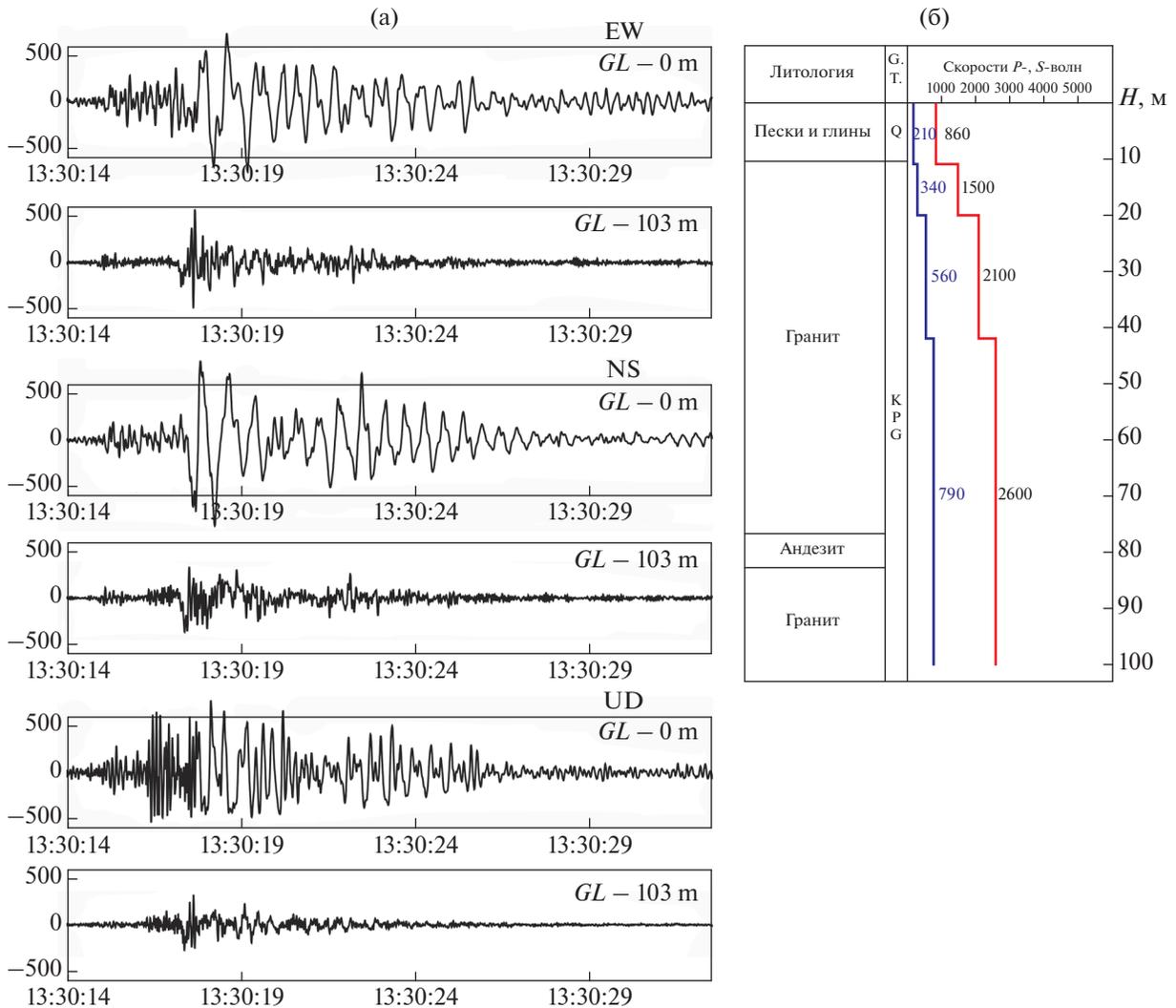


Рис. 2. Акселерограммы землетрясения в Тоттори (Япония) 6 октября 2000 г. ( $M_w \sim 6.7$ , глубина очага  $\sim 11$  км), зарегистрированные станцией TTRN02 (сети KiK-net) на поверхности и на глубине 103 м. Справа – параметры грунтового профиля.

ношению к прочным гранитным породам [Медведев, 1962].

Метод сейсмических жесткостей (МСЖ) получил широкое распространение в СССР. Вопрос о мощности грунтовой толщи, которую следует принимать во внимание в МСЖ, рассматривался разными авторами, и они сходятся в том, что обоснованы оценки приращений балльности по верхним 10–20 м грунта. М.А. Садовский и др. [Рекомендации ..., 1973] рекомендуют применять МСЖ для грунтовых толщ мощностью 10 м и более; ПНИИИС [Рекомендации ..., 1985] предлагается определять параметры грунта до глубины 20 м, в отдельных пунктах – для всего массива грунтов на скальных породах. Специалисты АО “Стройизыскания” оценивают минимальное и максимальное значения мощности расчетной толщи грунта в 10 и 20 м. Г.Н. Назаров, разработавший

палеточные способы определения приращений балльности для сейсмического микрорайонирования, отмечает относительную устойчивость средневзвешенных оценок в верхних 20 м [Назаров, 1969].

Введение поправок за грунтовые условия требовало принять некоторый грунт в качестве базового, относительно которого вводились поправки. В качестве такого грунта был принят “средний грунт”. Понятие “средний грунт” введено в 1960-х годах при описании последствий землетрясений, поскольку материалы обследований в пострадавших от землетрясений районах, служившие наблюдательной основой при построении карт сейсмического районирования, нельзя было отнести к определенным типам грунтов. “Средними” сначала названы все грунты, служившие основаниями фундаментов поврежденных зданий. Затем были

введены категории грунта: скальный грунт – 1-й категории, средний – 2-й категории и рыхлый – 3-й категории.

Сейсмичность (сейсмическая интенсивность) в баллах на площадке рассчитывалась на основе оценок на “средних грунтах” с применением метода сейсмических жесткостей. Сравнением сейсмических жесткостей ( $\rho V_s$  – произведения плотности грунта на скорость поперечных волн) в верхних 10 м данного грунтового профиля и “среднего грунта” находились поправки за грунтовые условия на площадке относительно “средних” грунтов – приращение балльности  $\Delta I$ . Такие подходы применялись в строительных нормах СССР начиная с 1969 г. [СНиП II-A. 12-69\*]. Аналогичные подходы применялись и в других странах. Проектирование и строительство сейсмостойких конструкций велось на основе заданных в строительных нормах спектров реакции для 3-х или 4-х категорий грунта, описывающих основные типы грунтов.

### С 1970-х ДО НАЧАЛА 2000-х ГОДОВ

Катастрофические землетрясения 1964 г. и начало строительства атомных станций в США стимулировали интенсивные исследования поведения грунтов в условиях динамического нагружения. Разрабатываются алгоритмы и программы расчета отклика грунта при землетрясениях; развиваются наблюдения с помощью вертикальных сейсмических групп. Интенсивно изучаются грунтовые толщи в сейсмических районах: состав слоев, мощности, резонансные частоты, параметры усиления сейсмических волн. Проведены масштабные исследования, результаты которых отражены в сборниках многочисленных конференций по сейсмическому районированию и локальным эффектам. Значительно усовершенствованы строительные нормы ряда стран в части учета отклика грунта при землетрясениях. Для оценки сейсмической опасности развиваются методы расчета акселерограмм сильных движений с учетом региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн и локальных условий в точке приема.

Десятилетия с 1970-х до 2000-х годов отмечены быстрым, почти революционным, развитием сейсмологии. Заметно улучшились наши знания об очагах землетрясений, особенностях распространения сейсмических волн и локальных эффектах землетрясений, связанных с влиянием приповерхностных грунтов, рельефа местности, топографии внутренних границ и неоднородностей среды. Успехи сейсмологии в эти годы обусловлены развитием в мире сейсмических наблюдений.

1. После разрушительных землетрясений 1964 г. в Анкоридже (США,  $M = 9.1$ ) и Ниигате (Япония,

$M = 7.5$ ), сопровождавшихся катастрофическим разжижением грунта и огромным экономическим ущербом, исследования поведения грунтов в условиях динамического нагружения стали приоритетным, хорошо финансируемым научным направлением в США, где в те годы началось строительство атомных станций. Сейсмичность территории США вызывала большие опасения. В пионерских работах [Hardin, Drnevich, 1972a; b; Seed, Idriss, 1971; 1982; Lysmer et al., 1975; Joyner, Chen, 1975] в лабораторных экспериментах изучено поведение связных и несвязных грунтов при динамическом нагружении, развиты численные методы анализа, разработаны алгоритмы и программы, которые и сегодня успешно используются для расчета отклика грунта при землетрясениях: программы эквивалентного линейного анализа SHAKE, QUAD-4, LUSH, FLUSH, FDEL и др., нелинейного анализа NONLI, CHARSOIL, HD-CP, TESS, MASH и др., анализа полных и эффективных напряжений DESRA, TARA и др., программы на основе усовершенствованных конституционных моделей DYSAC2, DYNAFLOW, SWANDYNE, DIANA и другие.

2. После катастрофического землетрясения 1995 г. в Кобе в Японии началось развитие плотных сетей сейсмических наблюдений. С 1996 г. в непрерывном режиме ведется регистрация сильных движений наземными станциями K-NET (более 1000 акселерометров) и вертикальными группами KiK-net (более 700 вертикальных групп; группа состоит из 2-х акселерометров, один из которых установлен на поверхности, а другой в скважине на глубине 100–200 м или более).

Сейсмические наблюдения активно развивались и в других странах: в США, Тайване, Новой Зеландии. Создавались базы данных по сильным движениям, теоретическая основа для анализа которых была создана в 1970-х годах. Алгоритмы и программы расчета отклика грунта тестировались по записям вертикальных групп; исследовались и другие локальные эффекты землетрясений: эффекты рельефа и внутренних границ осадочных бассейнов.

Полученные записи показали существенное влияние грунтовых слоев на параметры колебаний поверхности при землетрясениях. Установлены три основных механизма преобразований сейсмических волн в грунтовых слоях: усиление колебаний вследствие перехода сейсмических волн в верхние слои с меньшими значениями скоростей и плотностей; резонансное усиление колебаний в слоях с пониженными значениями скоростей и плотностей, приводящее также к увеличению их продолжительности; нелинейность связи напряжений и деформаций в грунтовых слоях, приводящее, как правило, к ослаблению колебаний. Результатом действия трех механиз-

мов обычно является усиление слабых сейсмических колебаний в грунтах и ослабление сильных [Yoshida, Iai, 1998].

Эти механизмы взаимосвязаны и учитываются в программах расчета отклика грунта. Проявления первых двух механизмов зависят от соотношения длины волны и толщины слоя: при толщине слоя, малой, по сравнению с длиной волны, амплитуды колебаний в слое определяются только его сейсмической жесткостью; при увеличении толщины слоя проявляются его резонансные свойства, и дополнительное возрастание амплитуды может быть трех–четырёхкратным.

Если осадочные отложения горизонтально-слоистые, резонансные явления имеют место только для объемных волн, распространяющихся вертикально в осадочной толще. Если осадочная структура 2-х- или 3-х-мерная, т.е. имеются горизонтальные неоднородности, например, вариации мощности осадочных бассейнов, резонансные явления также наблюдаются для поверхностных волн, развивающихся на таких неоднородностях [Bard, 1995].

Простое усиление, без изменения длительности и частотного состава колебаний, происходит в градиентных средах без резких сейсмических границ; в качестве примера приведем записи землетрясения 1987 г. в Нортридже (США). В средах с выраженными сейсмическими границами наблюдаются резонансные эффекты. Яркие проявления резонансных эффектов в грунтовых слоях отмечены при землетрясениях 1985 г. в Мехико (Мексика,  $M = 8.1$ ) и 1988 г. в Спитаке (Армения,  $M = 7.0$ ) [Айзенберг, 1989].

Новые землетрясения стимулировали масштабные исследования грунтовых толщ для прогноза параметров колебаний поверхности при будущих сильных землетрясениях. Активно изучались осадочные бассейны в разных районах Японии, Тайваня, Новой Зеландии, Северной и Южной Америк, Португалии, Испании, Италии, Швейцарии, Франции. По записям сейсмических шумов, слабых землетрясений и взрывов, по гравитационным аномалиям оценивались коэффициенты усиления сейсмических колебаний на разных частотах, преобладающие частоты колебаний, мощности, состав и строение грунтовых толщ, их способность к разжижению. Записи сильных движений, сделанные вертикальными группами, позволили продвинуться в понимании нелинейности отклика грунта при сильных землетрясениях.

В результате этих исследований существенно усовершенствовались строительные нормы европейских стран, США и Японии в части учета поведения грунтов при землетрясениях. Количество категорий грунта увеличилось с 3–4-х до 5-ти основных и 2-х дополнительных, наихудших в сей-

смическом плане и требующих специальных исследований. Категории грунта выделялись на основе представительных данных о составе и параметрах грунтовых толщ, собранных на территориях этих стран. В европейских нормах появилась категория грунта с выраженными резонансными свойствами (E) [Eurocode-8, 2004], а в нормах США нет, поскольку на территории США такие грунты не распространены [IBC, 2012]. Другие различия норм США и стран Евросоюза также связаны с региональными особенностями этих территорий.

#### С 1990–2000-х ГОДОВ ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Продолжаются исследования, начатые в прошлые годы. Изучаются региональные особенности очагов землетрясений и характеристик путей распространения сейсмических волн. Усложняются программы расчета отклика грунта.

Развиваются методы анализа записей сильных движений, направленные на изучение особенностей очагов землетрясений, параметров пути распространения и локальных условий в точке приема. Разрабатываются методы оценки параметров грунта, необходимых для расчета акселерограмм сильных движений: сейсмических скоростей и плотностей в верхних десятках метров грунтовых толщ. Широкое распространение получили методы “пассивного мониторинга”, основанные на регистрации сейсмического шума передвижными сейсмическими станциями. Поскольку сейсмический шум состоит преимущественно из поверхностных волн, обладающих свойствами дисперсии, скоростной профиль  $S$ -волн  $V_s(z)$  под регистрирующей группой (5–10 станций) может быть получен инверсией фазовой скорости. После обработки трехкомпонентных записей шума (регистрация ~10–30 минут в каждой точке) получаем 3D-строение грунтовой толщи до глубин 40–150 м (порядка апертуры поверхностной группы) [Aki, 1957; Okada et al., 1990].

Продолжается изучение локальных эффектов землетрясений, связанных с откликом грунта на сейсмические воздействия.

В Японии – стране, больше других стран пострадавшей от землетрясений, развиваются методы и подходы, направленные на возможно более точную и детальную оценку сейсмических воздействий. Для всей территории методами томографии изучены строение и скоростная структура коры и верхней мантии от нижних границ до сейсмического фундамента ( $V_s = 3$  км/с); по данным глубоких скважин, сейсморазведки, гравиметрии и записям микросейсм получена структура осадочного слоя от сейсмического до инженерного фундамента ( $V_s = 400–700$  м/с). Строение припо-

верхностных грунтовых слоев до глубины инженерного фундамента изучено по данным скважин и поверхностной геологии. По данным о сейсмических скоростях в верхних слоях оценены коэффициенты усиления сейсмических волн в узлах сетки с шагом 1 км для всей территории. По записям прошлых землетрясений строятся детальные модели очаговых зон в разных районах с характерными региональными параметрами количества и расположения асперити, уточняются модели затухания и рассчитываются карты сейсмической интенсивности при ожидаемых в будущем сильных землетрясениях.

Изменилась концепция микрорайонирования: оно стало выполняться на основе расчета акселерограмм сильных движений. В своей обзорной работе, представленной на 4-й Международной конференции по сейсмическому районированию Аки и Ирикура сформулировали свой подход к проблеме оценки сейсмической опасности: “сообщество пользователей карт сейсмического районирования разнообразно, и требуемые параметры сильных движений также разнообразны. Поскольку любой параметр может быть получен из акселерограмм, мы должны рассчитывать акселерограммы для заданных пар источник—приемник с использованием современных методов, на основе современных знаний об очагах землетрясений, параметрах пути распространения и локальных условиях в точке приема” [Aki, Irikura, 1991]. Локальные эффекты должны оцениваться не сами по себе, а для конкретных сейсмических воздействий (характеризуемых интенсивностью, частотным составом и продолжительностью), которые определяются сейсмическими очагами данного региона и свойствами среды распространения сейсмических волн в регионе.

Российские сейсмологи также отмечали, что “оценку влияния грунта и рельефа на параметры воздействия нельзя проводить в отрыве от характеристик очаговых воздействий, т.к. влияние местных условий может быть различным в зависимости от углов подхода волн, частотного состава, их интенсивности и т.д.” [Оценка ..., 1988; Штейнберг и др., 1993].

Сегодня сейсмология сильных движений вышла на качественно новый уровень, когда стало возможно гораздо точнее, чем прежде, рассчитать сейсмические воздействия от возможных в будущем сильных землетрясений, с учетом особенностей их очагов, путей распространения сейсмических волн и локальных условий в точке приема. В оценке сейсмической опасности общепринятым подходом стала оценка параметров сильных движений (пиковых величин, спектров реакции и т.п.) на основе расчета акселерограмм. Наряду с успехами инженерной сейсмологии развиваются методы сейсмостойкого строительства, и доста-

точно сильные землетрясения с магнитудами  $M \sim 7$  становятся не опасны.

## СИТУАЦИЯ В РОССИИ

В России 1980–1990-е годы были трудными в экономическом плане годами перестройки, когда русские сейсмологи практически не могли знакомиться с новыми быстро развивающимися методами и достижениями сейсмологии. Международные сейсмологические журналы и труды конференций в России оказались труднодоступны и большей частью до сих пор не изучены. Вероятно поэтому в микрорайонировании по-прежнему широко применяются и отстаиваются известные с 1960-х годов устаревшие подходы.

При этом в стране активно ведется строительство, в районах с высокой сейсмической опасностью — на Кавказе, Камчатке, Дальнем Востоке, в Байкальском регионе — возводятся современные сооружения со сложной архитектурой, требующие применения современных методов оценки сейсмической опасности.

На сегодняшний день в сейсмологии разработаны методы и подходы, позволяющие сделать расчеты и спрогнозировать сильные движения в любом регионе. Однако точность прогноза зависит от знания региональных параметров (сейсмических очагов, среды распространения сейсмических волн, локальных условий в точке приема), и задача сейсмологов — изучение региональных характеристик сейсмических областей — Камчатки, Кавказа, Магаданской области, Прибайкалья, Сахалина, Урала и других; их параметры могут существенно различаться от региона к региону [Павленко, 2011].

Изучение свойств сейсмических очагов, среды распространения сейсмических волн и локальных сейсмических эффектов, типичных для России — актуальная задача будущего. Такие исследования ведутся. Получены параметры, описывающие закономерности излучения и распространения сейсмических волн в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне [Pavlenko, 2013], на Северном Кавказе [Павленко, 2016], в Байкальской рифтовой зоне [Павленко, Тубанов, 2017], на Кольском полуострове [Pavlenko, Kozlovslaya, 2018]. Параметры оценены посредством решения обратных задач стохастического моделирования акселерограмм зарегистрированных землетрясений.

В области нормативной базы сейсмостойкого строительства в России имеются серьезные проблемы, которые требуют обсуждения и скорейшего решения [Гусев, 2003].

В 1990-х годах строительные нормы России, США, Японии и европейских стран были сходны в описании сейсмических воздействий и грунтовых условий. Грунтовые условия определялись

3–4-мя категориями грунта, поведение которых при сейсмических воздействиях описывалось спектрами реакции (в СССР – коэффициентами динамичности, т.е. нормированными спектрами реакции).

К настоящему времени строительные нормы США, Японии и европейских стран значительно усовершенствованы с учетом современных достижений сейсмологии. Число категорий грунта увеличено до 5-ти основных и 2-х дополнительных, требующих специальных исследований; для основных категорий грунта заданы спектры реакции. В нормах европейских стран спектры реакции задаются для 2-х типов землетрясений, сильных и более слабых. Описания категорий грунта и сейсмических воздействий определяются местными условиями, т.е. особенностями сейсмичности территорий и преобладающими типами грунтов. Созданию строительных норм предшествовала большая работа, включающая сбор и анализ данных о грунтовых разрезах, полевые измерения сейсмического шума, регистрацию слабых и сильных землетрясений, численное моделирование.

В России строительные нормы СНиП II-7-81\* “Строительство в сейсмических районах” актуализировались в 2011, 2013, 2014, 2016 и 2018 годах, однако в разделах описания сейсмических воздействий и грунтовых условий нормы существенно не изменились по сравнению с документами 1980-х годов, а в описании коэффициентов динамичности заметно упростились.

Разделы СП, посвященные описанию сейсмических воздействий и грунтовых условий, являются существенной частью строительных норм. В актуализированных СП сохранились устаревшие подходы, которые не отвечают современному уровню развития сейсмологии и очевидно должны быть изменены.

Необходимо ввести новую классификацию грунтов, соответствующую условиям России. В действующих СП 14.13330.2018 расчетная сейсмичность площадки строительства в баллах определена для 4-х категорий грунтов; и 6 примечаний описывают детали строения грунтовых толщ, позволяющие отнести грунт к той или иной категории.

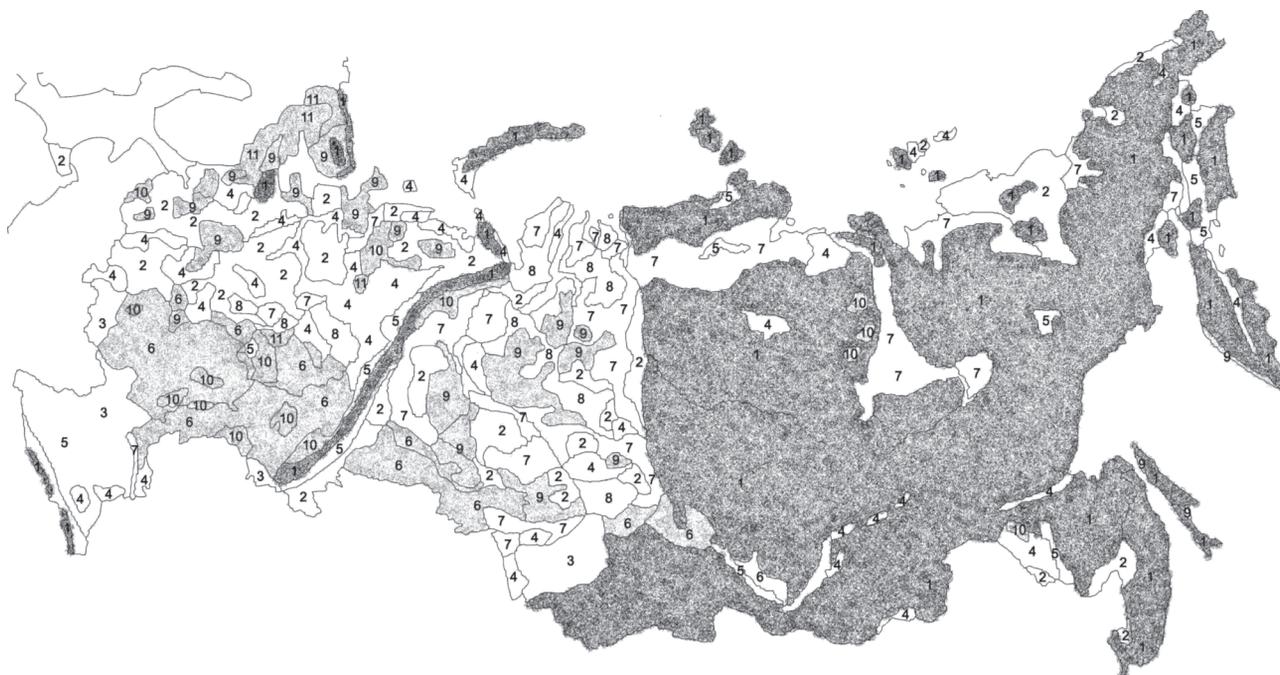
Однако грунтовые условия описываются 4-мя категориями грунта в небольших по территории странах (например, Армении, Казахстане), а для территории России четырех категорий грунта явно недостаточно. Приповерхностные грунты на территории России изучены, составлена карта их пространственного распределения [Инженерная геология России ..., 2011]. Выделено 11 типов наиболее представительных по площади развития грунтов: преимущественно скальные грунты (1), глинистые (2), лессовые (3), песчаные (4), глинистые с обломочным материалом (5), глинистые с

лессовым слоем в верхней части разреза (6), песчано-глинистые с преобладанием глинистых в верхней части разреза (7), песчано-глинистые с преобладанием песчаных в верхней части разреза (8), торфяные, подстилаемые грунтами разного состава (9), глинистые, подстилаемые скальными (10) и песчаные, подстилаемые скальными (11) (рис. 3). Грунты типов 6, 9, 10 и 11 с выраженными резонансными свойствами (рыхлый слой на жестком полупространстве) занимают около 25% территории России в европейской части, Западной и Восточной Сибири и Приморском крае (рис. 3). Эти грунты опасны при землетрясениях из-за возможных резонансных эффектов, поскольку усиливают сейсмические колебания и увеличивают их продолжительность. Примеры разрушительных землетрясений (Мехико 1985 г., Спитак 1988 г.) показывают, что такие грунты требуют особого внимания. Эти грунты следует выделить в отдельную категорию, как это сделано в европейских строительных нормах. Классификация грунтов, отвечающая условиям России, должна включать 5 основных категорий грунта: 4 категории грунтов разной прочности, от скальных до рыхлых, и категория грунтов с выраженными резонансными свойствами, а также 2 дополнительных категории слабых, неблагоприятных для строительства грунтов, требующих специальных исследований.

В качестве “базовых” следовало бы выбрать скальные грунты вместо “средних”, как это принято в большинстве стран. Преимущественно скальные грунты занимают больше половины территории России [Инженерная ..., 2011] – огромные пространства Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока. В европейской части России они распространены на Большом Кавказе, Урале, Кольском полуострове.

В действующих СП базовыми являются “средние грунты”, и сейсмические воздействия на скальных и мягких грунтах оцениваются на основе воздействий на “средних грунтах”. Однако корректный пересчет сейсмических воздействий от одних грунтовых условий к другим существенно затруднен из-за необходимости учета нелинейных явлений и резонансных эффектов в грунтовых слоях, а также из-за неопределенности понятия “средний грунт” (поскольку грунты на территории России изучены и описаны, понятие “средний грунт” теряет смысл). Программы для оценки отклика грунта построены как пересчет движений на скале в движения на поверхности грунта. Выбор скальных грунтов в качестве базовых позволит получать корректные оценки сейсмических воздействий.

С выбором базовых грунтов тесно связан вопрос о поправках на грунтовые условия. В действующих СП, в соответствии с методом сейсми-



**Рис. 3.** Карта пространственного распределения приповерхностных грунтов на территории России (из работы [Инженерная ..., 2011]). 11 типов наиболее представительных по площади развития грунтов: преимущественно скальные (1), глинистые (2), лессовые (3), песчаные (4), глинистые с обломочным материалом (5), глинистые с лессовым слоем в верхней части разреза (6), песчано-глинистые с преобладанием глинистых в верхней части разреза (7), песчано-глинистые с преобладанием песчаных в верхней части разреза (8), торфяные, подстилаемые грунтами разного состава (9), глинистые, подстилаемые скальными (10) и песчаные, подстилаемые скальными (11). Темно-серым выделены преимущественно скальные грунты (тип 1); светло-серым – грунты с выраженными резонансными свойствами (типы 6, 9, 10 и 11).

ческих жесткостей, балльность  $I$  увеличивается на 1 при переходе от скальных грунтов к “средним” или при переходе от “средних” к рыхлым. Как неоднократно отмечалось [Гусев, 2003], такие оценки расчетной сейсмичности некорректны и дают опасное, примерно двукратное, занижение ускорений на скальных грунтах и переоценку ускорений на рыхлых грунтах.

В методе сейсмических жесткостей приращение балльности относится к широкому диапазону частот; спектральные особенности отклика грунта не учитываются. Лежащие в основе МСЖ наблюдения относятся в основном к слабым воздействиям, поскольку для сильных воздействий были бы существенны нелинейные эффекты отклика грунта, приводящие к снижению балльности на слабых грунтах из-за нелинейного затухания. В действующих СП предлагается применять МСЖ для мощностей грунтовых толщ 30 м, что некорректно (напомним, что вопрос о мощности грунтовой толщи, которую следует принимать во внимание в МСЖ, рассматривался разными авторами, и они сходятся в том, что обоснованы оценки приращений балльности по верхним 10–20 м) и снижает балльность, поскольку параметры “средних грунтов” и грунтов площадки оказываются

ближе друг к другу из-за сходства строения глубоких слоев.

Поправки за грунтовые условия следует вводить посредством спектров реакции или пересчетом движений на скале, как это делается в строительных нормах США и Европы. В США грунтовые поправки вводятся посредством задания локальных коэффициентов усиления спектров реакции [ИВС, 2012], в европейских странах – посредством задания спектров реакции для грунтов основных категорий [Eurocode 8, 2004]. Локальные коэффициенты усиления и спектры реакции получены в результате исследований и анализа представительных данных, проведенных в последние десятилетия, когда в России такие работы не велись.

Выполнение аналогичных исследований в России – актуальная задача будущего. Пока исследования не проведены, следует использовать опыт европейских стран. В плане учета грунтовых условий и сейсмических воздействий условиям России отвечают европейские строительные нормы, поскольку: (1) классификация грунтов в Eurocode 8 соответствует представительным по площади развития грунта на территории России, (2) спектры реакции в Eurocode 8 разработаны для

2-х типов землетрясений, что также актуально для России, где происходят различные по своим характеристикам субдукционные и коровые землетрясения.

В новых редакциях карт сейсмического районирования территории РФ также следует принять скальные грунты в качестве базовых.

Действующие в настоящее время карты ОСР-2015 являются копиями карт ОСР-97, за небольшими исключениями (в Якутии две зоны балльности объединены в одну; в Калининградской области после землетрясения 21.09.2004 г. повышена балльность; включены карты Крыма ОСР-2004 [Уломов, 2016, Сравнение карт ОСР-97 с их компиляцией – ОСР-2015]). Несомненно, карты ОСР-97 – большое достижение отечественной сейсмологии, однако они нуждаются в уточнении. Карты актуализировались в 2012, 2014 и 2016 годах, но при этом не были использованы необходимые инженерные данные о региональных параметрах излучения и распространения сейсмических волн. Для всей огромной территории России использовалось лишь одно значение добротности среды,  $Q \sim 150$  на частоте 1 Гц, и соотношения связи сейсмической интенсивности с пиковым ускорением, полученные по данным Калифорнии (США) – региона со своими, не характерными для России, особенностями. Это очевидно приводит к ошибкам, особенно выраженным при картировании пиковых ускорений.

При построении карт ОСР картируемые параметры сейсмических воздействий оцениваются на основе эмпирических уравнений прогнозных движений грунта (УПДГ), для учета региональных особенностей излучения и распространения сейсмических волн. На большой территории России представлены все три известных типа сейсмичности: 1) области с сейсмически активной тектонической корой с частыми мелкофокусными землетрясениями (как Северный Кавказ); 2) области стабильных континентальных плит с редкими землетрясениями (Восточно-Европейская, Сибирская платформы); 3) зоны субдукции, с повышенной сейсмической активностью (Курило-Камчатская зона) [Pavlenko, Kijko, 2019]. Характеристики излучения и распространения сейсмических волн в регионах России с разными типами сейсмичности существенно различаются [Павленко, 2011], и актуальной задачей российских сейсмологов является изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн в разных регионах России. Необходимо создание в России базы данных по сильным движениям и на ее основе изучение региональных закономерностей излучения и распространения сейсмических волн и разработка региональных УПДГ.

Помимо описанных выше основных изменений необходимо также иметь в виду (и внести в

СП) следующее: (1). В определенных случаях проводить исследования для определения резонансных частот грунтовых толщ (изучать строение грунта до глубин ~60–80 м, либо до скального основания) для учета возможных резонансных эффектов; такое решение было принято после обследований катастрофических разрушений в г. Ленинкане (теперь г. Гюмри, Армения), связанных с резонансным откликом грунтовых толщ, после Спитакского землетрясения 1988 г. (2). Учитывать эффекты усиления сейсмических колебаний рельефом местности.

Выполнение этих условий позволит отойти от методологий 1970–1980-х годов в оценке сейсмических воздействий и учесть грунтовые условия и вывести нормативные документы на современный высокий научный уровень.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айзенберг Я.М.* Строительная наука против стихии // Природа. 1989. 12. С. 68–77.
- Гусев А.А.* Некоторые вопросы сейсмологического обоснования норм сейсмостойкого проектирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 1. С. 32–36.
- Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России / Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ. 2011. 672 с.
- Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат. 1962. 284 с.
- Назаров Г.Н.* Методические указания по комплексным сейсмогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям с применением портативных сейсмо-разведочных установок. ВИА. Москва. 1969. 120 с.
- Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию / Отв. ред. О.В. Павлов М.: Наука. 1988. 224 с.
- Павленко О.В.* Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Научный мир. 2009. 258 с.
- Павленко О.В.* Различия региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн на Камчатке и Северном Кавказе // Докл. РАН. 2011. Т. 438. № 5. С. 687–693.
- Павленко О.В.* Характеристики излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе, оцененные по записям сейсмостанций “Сочи” и “Анапа” // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43. № 1. С. 49–61.
- Павленко О.В., Тубанов Ц.А.* Характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской Рифтовой зоне, оцененные моделированием акселерограмм зарегистрированных землетрясений // Физика Земли. 2017. № 1. С. 20–33.
- Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию РСМ-73. Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний // Вопросы инженерной сейсмологии. 1973. Т. 15. С. 6–34.

- Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. М.: ПНИИИС. 1985. 72 с.
- СНиП II-A.12-69\* Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. Постановление Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства от 02 октября 1969 года №117. М.: Стройиздат. 1977.
- Свод правил СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Москва. 2018.
- Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСП-97. Карта на 4-х листах / Гл. ред. Страхов В.Н., Уломов В.И. ОИФЗ РАН. М.: НПП Текарт. 2000.
- Уломов В.И. Сравнение карт ОСП-97 с их компиляцией – ОСП-2015. 2016. [http://seismos-u.ifz.ru/personal/documents/ОСП-97\\_ОСП-2015\\_.pdf](http://seismos-u.ifz.ru/personal/documents/ОСП-97_ОСП-2015_.pdf)
- Цифровая сейсмическая сеть сильных движений Японии <http://www.kyoshin.bosai.go.jp>
- Штейнберг В.В., Сакс М.В., Антикаев Ф.Ф., Алказ В.Г., Гусев А.А., Ерохин Л.Ю., Заградник И., Кендзера А.В., Коган Л.А., Лутиков А.И., Попова Е.В., Раутиан Т.Г., Чернов Ю.К. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. 1993. Т. 34. С. 5–93.
- Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors // Bulletin of the Earthquake Research Institute. 1957. V. 35. P. 415–456.
- Aki K., Irikura K. Characterization and mapping of earthquake shaking for seismic zonation. Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation. August 25–29. Stanford. California. 1991. V. 1. P. 61–110.
- Bard P.-Y. Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues. Proceedings of the 10th ECEE / Ed. Duma. Balkema. Rotterdam. 1995. P. 305–324.
- Boore D. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // Pure and Applied Geophysics. 2003. V. 160. P. 635–676.
- Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. BS EN. 2004.
- Gutenberg B. Effects of ground on earthquake motion // Bulletin of the Seismological Society of America. 1957. V. 47. P. 221–250.
- Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects // J. Soil Mechanics and Foundations Division. 1972a. V. 98. P. 603–624.
- Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves // J. Soil Mechanics and Foundations Division. 1972b. V. 98. P. 667–692.
- International Building Code. ISBN. 978-1-60983-040-3. 2012.
- Joyner W.B., Chen T.F. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. 1975. V. 65. № 5. P. 1315–1336.
- Lysmer J., Udaka T., Tsai C.-F., Seed H.B. FLUSH – A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems. Report No. EERC 75–30. Earthquake Engineering Research Center. University of California. Berkeley. 1975.
- Mallet R. Great Neapolitan Earthquake of 1857. London: Printed by William Clowes and sons, Stamford Street and Charing Cross. 1862.
- Okada H., Matsushima T., Moriya T., Sasatani T. An exploration technique using longperiod microtremors for determination of deep geological structure under urbanized areas // Busuritansa. 1990. V. 43. P. 402–417.
- Pavlenko O.V. Simulation of Ground Motion from Strong Earthquakes of Kamchatka Region (1992–1993) at Rock and Soil Sites // Pure and Applied Geophysics. 2013. V. 170. № 4. P. 571–595.
- Pavlenko V.A., Kijko A. Comparative study of three probabilistic methods for seismic hazard analysis: case studies of Sochi and Kamchatka // Natural Hazards. 2019. V. 97. № 2. P. 775–791. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03674-5>
- Pavlenko O., Kozlovskaya E. Characteristics of radiation and propagation of seismic waves in the Northern Finland estimated based on records of local earthquakes // Pure and Applied Geophysics. 2018. V. 175. № 12. P. 4197–4223.
- Reid H.F. The California Earthquake of April 18, 1906. V. 2. The Mechanics of the Earthquake. Carnegie Inst. of Washington Publ. 1910. 87 p.
- Seed H.B., Idriss I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1971. V. 97. P. 1249–1273.
- Seed H.B., Idriss I.M. Ground motion and soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute. 1982.
- Yoshida N., Iai S. Nonlinear site response and its evaluation and prediction. The effects of Surface Geology on Seismic Motion / Eds. Irikura, Kudo, Okada, Sasatani. 1998. Balkema. Rotterdam. P. 71–90.

## Modern Methods for Estimating Local Effects of the Earthquakes

O. V. Pavlenko\*

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

\*e-mail: olga@ifz.ru

Local effects pertain to the main factors determining the parameters of ground motion during earthquakes. The local effects associated with the response of the ground have always been paid much attention in the practice of engineering seismology since most urbanized regions in the world are situated in river valleys, on the soft young sedimentary deposits. The river valleys in the earthquake-prone areas host a number of the large cities of the world such as Tokyo, Osaka, Kobe, Los Angeles, San Francisco, San Salvador, Caracas, Lima,

Bogota, Kathmandu, Manila, Thessaloniki, Mexico City, etc. The abundance and significance of these effects has stimulated numerous instrumental, theoretical, and numerical studies aimed at better understanding and quantifying these effects. To date, in seismology the methods have been developed for the reliable assessment of these effects. In this paper, the methods that were used for assessing local effects of the earthquakes at the early stages of seismology and evolution of these methods up to the modern level are described.

*Keywords:* local effects, surface oscillation parameters, ground response