

## ВЛИЯНИЕ МЕСТНЫХ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ НА ЮЖНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ИЗМИРСКОГО ЗАЛИВА (Турция)

М. Куруоглы<sup>1</sup>, Т. Эскисар<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dokuz Eylul University, Department of Civil Engineering, Geotechnics Division, 35160, Buca, Izmir, Turkey

<sup>2</sup>Ege University, Department of Civil Engineering, Geotechnics Division, 35100 Bornova, Izmir, Turkey

Город Измир, расположенный на западной границе Турции, за время своего существования испытал множество сильных землетрясений. Южное побережье залива Измир, являющееся одной из наиболее плотно заселенных территорий Измира, сложено глубокопогруженными аллювиальными отложениями. В связи с этим большое значение приобретает выяснение влияния местных грунтовых условий на динамические характеристики грунта на изучаемой площади, где присутствуют рыхлые водонасыщенные аллювиальные отложения большой мощности.

Создана база данных, содержащая геотехническую и геологическую информацию. Согласно положениям NEHRP, большая часть территории подпадает под классы *D* и *E*. Анализ динамических характеристик территории проведен с помощью программы EERA с использованием полевых и лабораторных результатов испытаний и временных диаграмм землетрясений умеренной силы, таких как землетрясения в Измире 1977 г. ( $M_L = 5.3$ ), в Урле 2003 г. ( $M_d = 5.6$ ) и Узункую-Урле 2005 г. ( $M_L = 5.9$ ), которые произошли в районе и окрестностях Измира. Дополнительно также рассмотрен сценарий колебаний грунта, генерируемых разломом Измир с магнитудой 6.5, при среднем расстоянии 10 км от площади исследований. Проведена оценка данных, полученных при анализе динамики реакции участка на землетрясение, и подготовлены карты для участка южного побережья залива Измир, изображающие изменение динамических параметров на поверхности земли.

В ходе динамического анализа, проведенного с использованием моделей грунтов, распространенных на изученной площади, произведена верификация разрушений, вызванных Измирским землетрясением 1977 г. Моделируемое землетрясение вызвало максимальное ускорение грунта величиной более 0.6 g на восточной и западной границах изученной площади. Однако далекодействующие события вызвали почти пятикратное усиление спектров. Сделан вывод, что локальные грунтовые условия должны оцениваться индивидуально. Рекомендуется создание специфического для конкретного участка спектра плана для территорий, сложенных глубокозалегающими аллювиальными отложениями.

*Местные грунтовые условия, динамика реакции участка на землетрясение, максимальное ускорение грунта, спектральное усиление, Измир, Турция.*

### EFFECT OF LOCAL SOIL CONDITIONS ON DYNAMIC GROUND RESPONSE IN THE SOUTHERN COAST OF IZMIR BAY, TURKEY

M. Kuruoglu and T. Eskisar

The city of Izmir, located at the western end of Turkey, has experienced many strong earthquakes throughout its history. The southern coast of Izmir Bay, one of the most densely populated areas of Izmir, is located on deep alluvial sediments. It is important to determine the effect of local soil conditions on dynamic ground response in the study area, where thick loose water-saturated alluvial sediments exist. A database including geotechnical and geological information on the study area is constructed. Majority of the site is classified as D and E according to NEHRP provisions. Dynamic site response analyses are performed with EERA by utilizing the field and laboratory test results and earthquake time histories of moderate-scale earthquakes such as 1977 Izmir ( $M_L = 5.3$ ), 2003 Urla ( $M_d = 5.6$ ), and 2005 Uzunkuyu-Urla ( $M_L = 5.9$ ), which occurred in and nearby Izmir. In addition, a scenario ground motion generated by the Izmir Fault with a magnitude of 6.5, having an average distance of 10 km to the study area, is also considered. The output data obtained from the dynamic site response analyses are evaluated, and maps displaying variation in dynamic parameters on ground surface are prepared for the southern coast of Izmir Bay, Turkey. Consequently, the dynamic analyses performed with the soil models constituted for the study area verified the damage occurred in a close distance event of 1977 Izmir earthquake. The scenario earthquake resulted in peak ground accelerations more than 0.6 g at the eastern and western ends of the study area. However, long distance events resulted in spectral amplifications by up to 5 times. With this study, it is emphasized that local soil conditions should be evaluated individually in the area of interest. Generation of a site-specific design spectrum is recommended for the areas located on deep alluvial sediments.

*Local soil conditions, dynamic site response, peak ground acceleration, spectral amplification, Izmir, Turkey*

## ВВЕДЕНИЕ

Местные грунтовые условия оказывают большое влияние на характеристики движения грунта, когда вызванные землетрясением сейсмические волны распространяются через различные слои грунта по направлению к поверхности Земли. Эти слои могут оказывать основное влияние на амплитуду и спектральные характеристики сейсмических колебаний грунта в зависимости от его типа и глубины залегания, а также от уровня его колебаний даже при землетрясениях умеренной силы [Erdik, Durukal, 2004; Pitilakis, 2004; Eker et al., 2012; Дреннов и др., 2013].

В прошлом серьезные разрушения отмечались при многих землетрясениях, когда усиление колебаний грунта вследствие местных грунтовых условий являлось основной причиной разрушений. Можно привести несколько примеров таких землетрясений: 1957 г. в Гоби-Алтае, 1985 г. — в Мехико, 1989 г. — в Лома Приета, 1995 г. — в Кобе, 1999 г. — в Коджаэли-Дуче и 2008 г. — в Венчане (Koçkar, Akgun, 2012; Lunina et al., 2014). Опыт этих землетрясений показывает, что количественная параметризация местных грунтовых условий является обязательным компонентом исследований при оценке сейсмической опасности.

Катастрофические землетрясения произошли в 1688 г. ( $I_0 = X$ ;  $M = 6.8$ ) и в 1778 г. ( $I_0 = IX$ ;  $M = 6.4$ ) в г. Измир [Ambraseys, Finkel, 1995; Emre et al., 2005]. В течение последних 236 лет не происходило сильных землетрясений, вызывающих масштабные разрушения; однако землетрясения умеренной силы происходили почти в каждом десятилетии [BU KOERI 2012; DEMP-ED 2012]. Постоянно наблюдаемая сейсмическая активность требует оценки реакции грунта в окрестностях Измира на ожидаемое землетрясение. Кроме того, фонд строящихся зданий расширяется, и в настоящее время урбанизация продолжается на западном окончании южного побережья Измирского залива. По этим причинам проводятся исследования местных грунтовых условий на территории южного побережья Измирского залива (рис. 1).

В данном исследовании разработаны характеристики колебаний и спектры реакции для грунтов территории южного побережья Измирского залива с использованием имеющихся сейсмических записей землетрясений умеренной силы с близкорасположенными и удаленными эпицентрами в соответствии с принципами эквивалентно-линейного метода. После проведения анализа динамической реакции участка на землетрясение установлено, что на некоторых участках изученной площади достигнуты/превышены пределы спектров, определенные в Турецком сейсмическом кодексе [TSC, 2007].

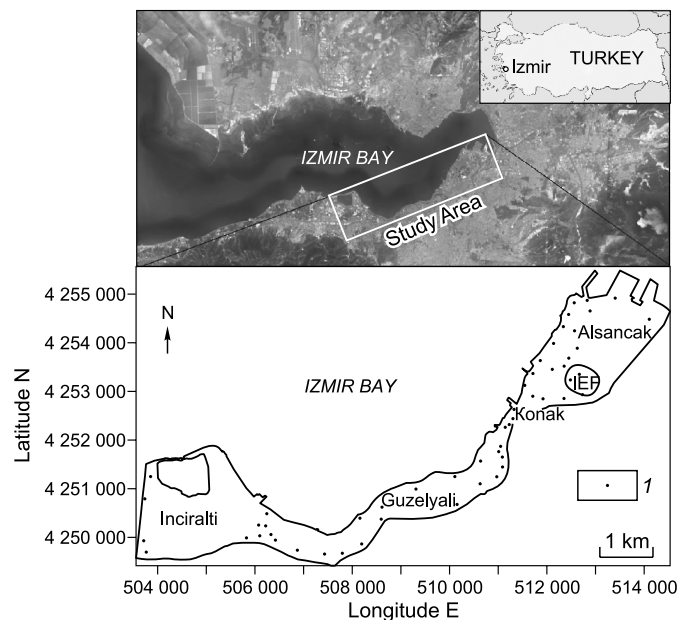
Береговая линия изученной территории располагается на мягких/рыхлых аллювиальных отложениях, которые могут резко усилить колебания грунта. Большинство зданий на изученной площади могут не обладать достаточной сейсмостойкостью, а относительно более новые здания, возведенные в 1970-х годах, построены в соответствии со старыми сейсмическими кодексами Турции (1940—1975 гг.), которые не содержат последних достижений в области инженерной сейсмологии и техники строительства в сейсмоопасных зонах. Новые разработки и рекомендации были своевременно добавлены в спецификации, и в последнее время для проектирования строительства применяется кодекс TSC, 2007.

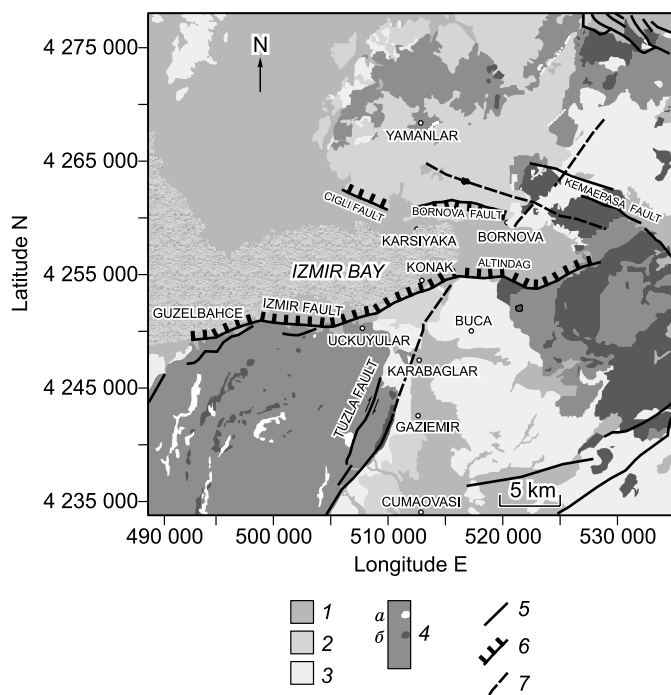
## ГЕОЛОГИЯ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ НА ПЛОЩАДИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отложения меланжевого комплекса Борнова, перекрывающие породы фундамента в районе Измир, подверглись интенсивным тектоническим деформациям на этапе седиментации и после него [Erdogan, 1990; Коса, 1995; Kincal, 2005; Kincal, Коса, 2009]. Осадочные породы неогенового возраста несогласно перекрывают породы меланжевого комплекса Борнова. Разрез неогеновых осадочных пород снизу вверх представлен конгломератами, песчаниками, расслоенными мергелями и известняками [Коса, Kincal, 2004]. В южной части Измирского залива глинистые и мергелистые разности осадочных пород перекрываются вулканитами андезитового состава. Четвертичные отложения сложены делю-

**Рис. 1.** Карта Турции с указанием расположения г. Измир и обзорная карта района работ.

1 — местоположение скважин. Здесь и далее: все координаты указаны в УППМ, зона 35.





**Рис. 2. Геологическая карта территории г. Измир с пригородами.**

1 — аллювий/конус выноса, 2 — вулканические породы, 3 — осадочные породы, 4 — серпентинит (а), известняк (б), 5 — разлом, 6 — обыкновенный сброс, 7 — сдвиг.

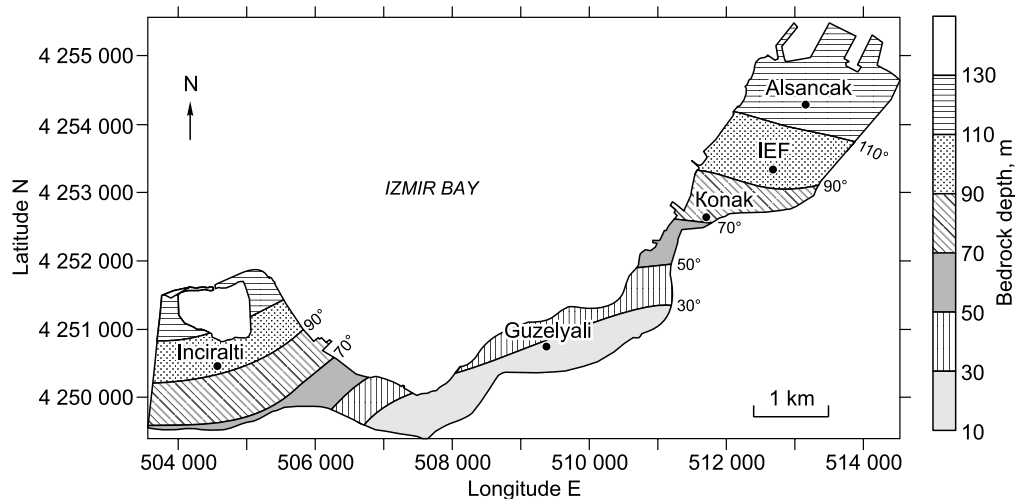
вием и аллювием, несогласно перекрывающим другие геологические серии. Аллювиальные грунты в юго-восточной части изученной площади представлены отложениями аллювиального конуса выноса. Локальная геология прибрежной зоны представлена четвертичными аллювиальными отложениями, обрамленными флишеидными отложениями (известняками) палеоценового возраста и песчаниками/глинистыми сланцами миоценового возраста [Sozibilir et al., 2008, 2009; Uzel et al., 2012]. Измирский разлом располагается на пересечении пачек известняков/песчаников и четвертичных аллювиальных отложений, имеет типичные характеристики сброса и протягивается парал-

лельно береговой линии. Общая геологическая ситуация и главные тектонические структуры показаны на рис. 2.

Глубина залегания коренных пород на исследованной площади варьирует согласно с наблюдаемыми стратиграфическими подразделениями. Глубина залегания коренных пород на участке Инциральти составляет 115 м, а на участке Алсанчак — 100 м [TUBITAK 106G159, 2012]. Если участки Конак и Алсанчак сложены глубокопогруженными аллювиальными отложениями, то на участке Гюзеляли глубина залегания коренных пород постепенно уменьшается, и они подходят к поверхности, а в некоторых местах наблюдаются обнажения пород андезитового состава неогенового возраста. Карта глубины залегания коренных пород приведена на рис. 3.

Уровень грунтовых вод понижается от береговой линии (2.8 м) к центру участка Инциральти (8.7 м). На участке Конак уровень грунтовых вод залегает на глубине от 2.0 до 2.5 м. На участке Алсанчак уровень грунтовых вод локально варьирует от 1.0 до 4.0 м. Прибрежная зона южного участка территории сложена в основном промышленными отходами, а уровень грунтовых вод здесь слабо варьирует около отметки 1.0 м.

Геотехнические свойства грунтов площади исследований оценены на основании данных бурения геологических и геотехнических компаний и данных, собранных при подготовке диссертационных ра-



**Рис. 3. Изменение глубины залегания коренных пород на южном побережье Измирского залива.**

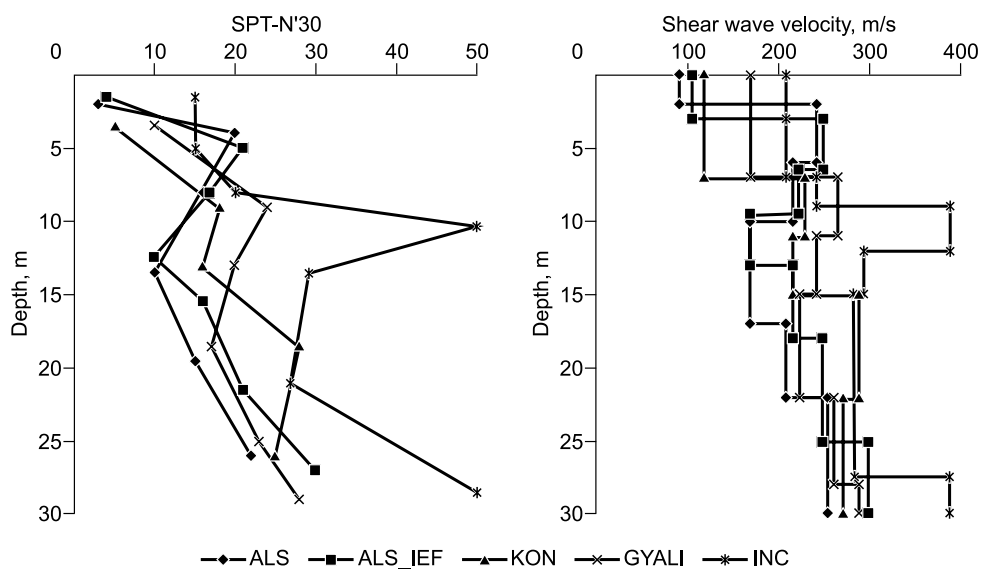
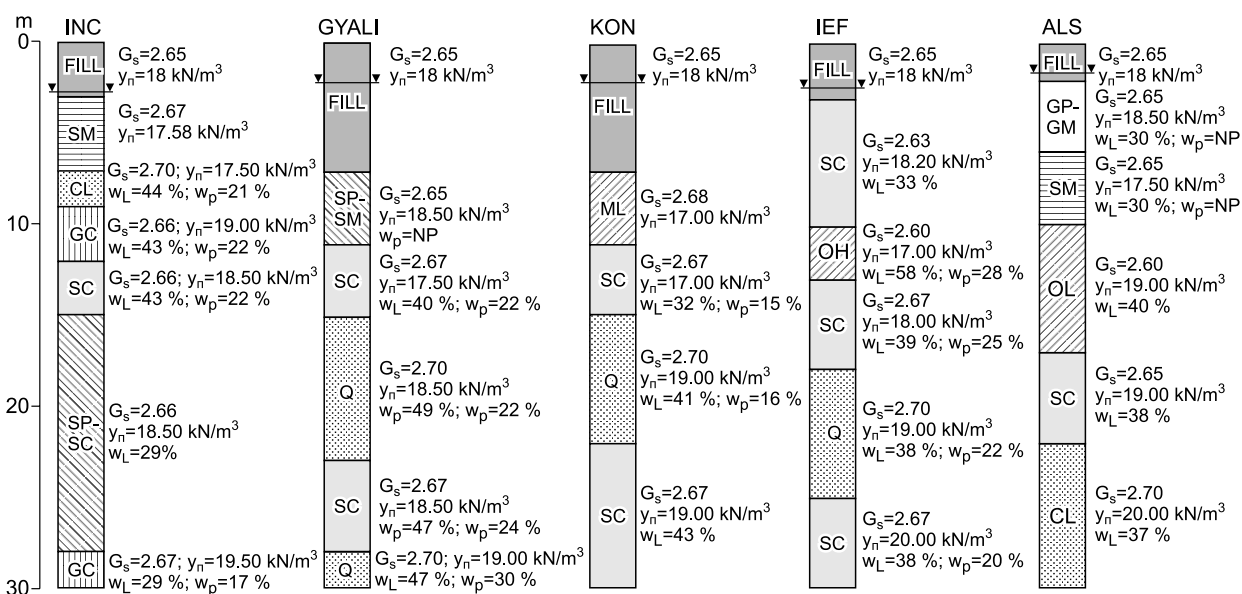
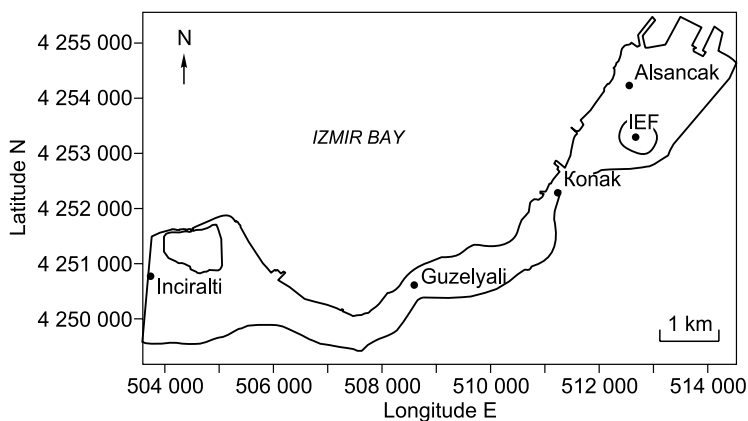
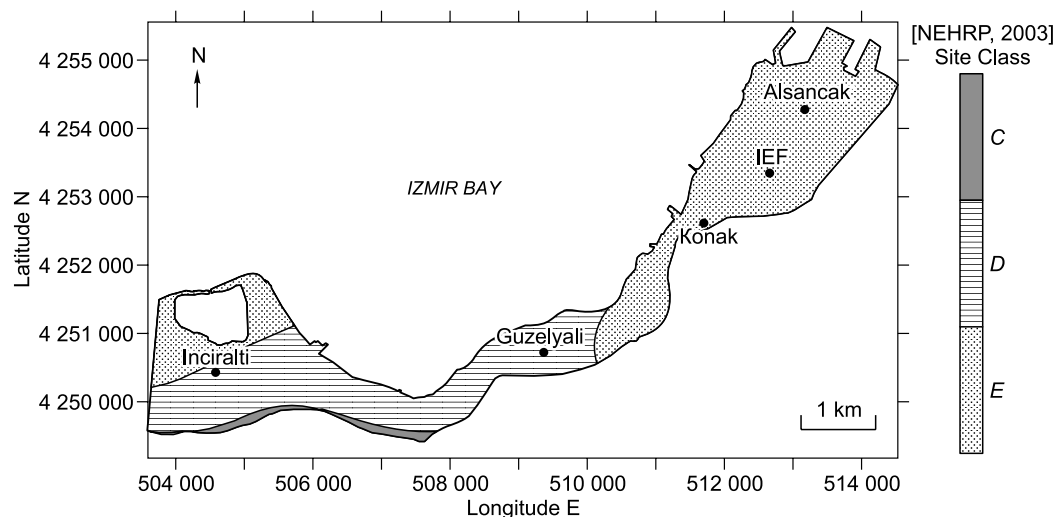


Рис. 4. Пять представительных разрезв с указанием свойств грунтов для различных районов площади исследований.

INC — Инциральти, GYALI — Гюзеляли, KON — Конак, IEF — район международной выставки Измира, ALS — Алсанчак. Типы грунтов в колонках даны по международной шкале.



**Рис. 5. Классы участков, определенные с использованием значений SPT-N для верхних 30 м разреза грунта на площади исследований [NEHRP, 2003].**

бот [Yalcin, 2008; Bozkurt, 2010; Gedik, 2012]. Скважины сгруппированы по пяти районам площади исследования, которые показаны на рис. 1. Для иллюстрации свойств грунтов в каждом районе подготовлены схематизированные колонки скважин, которые представляют геотехнические характеристики площади в целом. Этими районами являются береговая линия Алсанчак, район международной выставки Измира (IEF), а также районы Конак, Гюзеляли и Инциральти соответственно. Типы грунтов с характерными идентифицирующими свойствами для верхней 30-метровой части разреза представительных буровых скважин показаны на рис. 4, из которого следует, что основными грунтами являются глины/илы с высокой/низкой пластичностью и слои глинистых песков/глинистых галечников. Эквивалентные скорости поперечных сейсмических волн для верхних 30 м разреза береговой зоны Алсанчак составляют 150—200 м/с, а на других участках эти скорости достигают значений 225—275 м/с. Рассчитанные эквивалентные скорости распространения поперечных сейсмических волн в рыхлых сыпучих грунтах и связных грунтах низкой пластичности являются показателем низкой сдвиговой прочности подповерхностных слоев. В южной части побережья Гюзеляли на отдельных участках средняя скорость поперечных волн превышает 760 м/с благодаря выходам на поверхность агломератов и андезитов. Значения SPT-N (ударных воздействий/30 см) на площади варьируют в интервале 10—50 и концентрируются в интервале 10—20 (ударных воздействий/30 см) в первых 20 м от земной поверхности. Исследованная площадь классифицируется на основе подсчета ударных воздействий SPT-N, средних скоростей прохождения поперечных сейсмических волн и значений свободного сопротивления сдвигу в соответствии с положениями программы NEHRP<sup>1</sup> [2003]. В районах Алсанчак и Конак распространены грунты класса E (рис. 5). Эти данные согласуются с приведенной на рис. 2 обобщенной геологической картой, которая показывает наличие здесь аллювиальных отложений. Остальная площадь может быть отнесена к грунтам класса D. На карте, показанной на рис. 5, приведена общая классификация грунтов, развитых на площади исследований. Площадь включает несколько локальных зон, сложенных грунтами, соответствующими классу E, особенно на побережье Гюзеляли, поскольку оно в основном сложено техногенными отвалами.

Другая классификация базируется на Сейсмическом кодексе Турции [TSC, 2007]. В TSC [2007] грунты подразделяются на четыре основные группы по таким показателям, как подсчитанное количество ударных воздействий SPT-N, величина свободного сопротивления сдвигу и средняя скорость распространения поперечных сейсмических волн. Сочетание группы грунта и мощности верхнего слоя грунта определяет локальный сейсмический класс данного участка. Классам участков присвоены метки Z1—Z4, которые соответственно обозначают переход от твердых/очень прочных грунтов к слабым/очень рыхлым грунтам. Каждый класс участков (Z1—Z4) имеет свои собственные нижний ( $T_A$ ) и верхний ( $T_B$ ) характеристические периоды спектра плана. Согласно положениям [TSC, 2007], районы Алсанчак, Конак и порта Инциральти относятся к классу Z4 с учетом слоев рыхлого песка, мягкой глины и илистой глины, залегающих на глубине более 10 м от поверхности. Остальная часть площади относится

<sup>1</sup> National Earthquake Hazards Reduction Program — Национальная программа снижения опасности землетрясений.

к классу Z3, в который включаются песок и гравий средней плотности, среднепластичные глины и илистые глины, суммарная мощность которых превышает 15 м от поверхности.

### ВХОДЯЩИЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

Регистрируемые сильные колебания грунта классифицируются как события ближнего действия и дальнего действия. При анализе динамической реакции участка на землетрясение, базирующегося на моделях грунтов, построенных по скважинным материалам, в качестве события ближнего действия использовалась сейсмограмма Измирского землетрясения от 16 декабря 1977 г. ( $M_L = 5.3$ ), произошедшего в зоне Измирского разлома (см. рис. 2). Во время Измирского землетрясения 1977 г. пиковое значение ускорения обнажающихся коренных пород зарегистрировано на уровне 0.21 g. В амплитудном спектре пиковые значения зарегистрированы в полосе 6—15 Гц, при этом основная частота составила 9.91 Гц. Высокочастотный гармонический состав гистограммы этого землетрясения можно с успехом использовать для наблюдения за последствиями сейсмических колебаний от близкорасположенного источника на изученной площади. Затем сейсмограмма Измирского землетрясения 1977 г. была модифицирована для сценария землетрясения с  $M = 6.5$ . Частотный спектр сейсмограммы был оставлен без изменения, а амплитуды ускорения были масштабированы по оценкам ускорения коренных пород, рассчитанными с учетом соотношений ослабления. В соответствии со сценарием моделируемого землетрясения, зона Измирского разлома, трактуемого как обычный сброс, имеет длину 20 км, ширину 10 км и падение на север под углом 60 градусов. Этот сценарий аналогичен ранее проведенному, промоделированному проектной командой RADIUS (Risk Assessment tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic disasters — Инструменты оценки рисков сейсмоопасности для городских застроек) [Erdik et al., 1999]. Площадь территории разрушений, оцененная по соотношениям разрушение—магнитуда землетрясения [Erdik et al., 1999], согласуется с результатами из работы [Wells, Coppersmith, 1994], где рассчитанная протяженность зоны поверхностных разрушений составляет 18.4 км.

С. Абик с соавторами [Abik et al., 2005] исследовали ослабление сейсмического момента с использованием модифицированного варианта алгоритма Хорста [Hurst, 1951] и привели данные о возможной магнитуде главного эпизода Измирского землетрясения, которая могла достигать величины  $M_w = 6.5$ . В работе [Bjergum, Atakan, 2008] проведено моделирование землетрясений по девяти разломам в окрестностях Измира; для Измирского разлома были сформулированы три сценария, соответствующие разрушению западного сегмента и восточного сегмента. Получены оценки моментных магнитуд для каждого сегмента, равные 6.5. Авторы [Polat et al., 2008] оценили сейсмическую опасность района с использованием фрактального поведения,  $z$ - и  $b$ -параметров сейсмического затишья Гутенберга—Рихтера в предположении, что величина разрушительного землетрясения может достигать значения  $M_s = 6.5$ . Эти авторы сделали вывод о том, что более сильные землетрясения в этом районе маловероятны из-за высвобождения сейсмического момента при слабых и умеренных по силе землетрясениях. По этой причине в данной работе рассматривался сценарий землетрясения с  $M_w = 6.5$ , который также согласуется с работами [Erdik et al., 1999; Abik et al., 2005; Polat et al., 2008]. В качестве землетрясений дальнего действия рассматриваются землетрясение Урла, произошедшее 10 апреля 2003 г. ( $M_d = 5.6$ ), и Узункую-Урла, произошедшее 20 октября 2005 г. ( $M_L = 5.9$ ). Эти землетрясения породили сбросы с горизонтальным смещением, и они относятся к классу землетрясений умеренной силы, произошедших в окрестностях Измира. Координаты гипоцентра и расстояния до эпицентра этих землетрясений приведены в табл. 1. Пиковое ускорение грунта во время землетрясения Урла 2003 г. ( $M_d = 5.6$ ) зарегистрировано на уровне 0.079 g. В амплитудном спектре максимальные значения зарегистрированы в полосе 0.4—2.8 Гц, при этом основная частота составила 0.78 Гц. Пиковое ускорение грунта во время землетрясения Узункую-Урла ( $M_L = 5.9$ ) зарегистрировано на уровне 0.03 g. В амплитудном спектре максимальные значения зарегистрированы в полосе 0.5—2.5 Гц, при этом основная частота составила 0.63 Гц. Низкочастотный спектр этих землетрясений удобно описывать, как дальнодействующие колебания грунта.

Перед проведением анализа реакции участка на землетрясение необходимо оценить максимальное ускорение на уровне коренных пород. При оценке максимального ускорения грунта на глубине залегания коренных пород учитываются магнитуда землетрясения, расстояние от источника до участка, механизм образования разломов и местные грунтовые условия. С этой целью используются недавно выведенные [Ambraseys et al., 2005; Campbell, Bozorgnia, 2008; Abrahamson, Silva, 2008; Boore, Atkinson, 2008] соотношения затухания (NGA). Авторы работ [Campbell, Bozorgnia, 2006; Stafford et al., 2008] уверяют, что для большинства инженерных приложений и особенно в подходах к сейсмостойкому проектированию, основанных на смещении, NGA-модели, в том числе модели [Campbell, Bozorgnia, 2008; Abrahamson, Silva, 2008; Boore, Atkinson, 2008], можно уверенно использовать применительно к территории Европы и Средиземноморского региона, включая Турцию. В моделях затухания также использу-

Таблица 1. Параметры землетрясений, рассматриваемых в этом исследовании

Землетрясение	Магнитуда	Тип разлома	Гипоцентрические координаты (в УПМ)		Расстояние от эпицентра, км	Глубина, км	Длина разрыва на поверхности, $L$ , км	Направленность
			Долгота	Широта				
Измирское, 1977 г.	5.3 ( $M_L$ )	Нормальный	518851	4254216	11	24	2.7	СВ
Урла, 2003 г.	5.6 ( $M_d$ )	Сбрососдвиг	496324	4230354	26	11	4.2	ЮЗ
Узункую-Урла, 2003 г.	5.9 ( $M_L$ )	»	478179	4222734	43	8	10	ЮЗ

Таблица 2. Максимальные ускорения на уровне коренных пород, оцененные по различным соотношениям затухания на площади исследований

Землетрясение	Максимальное ускорение коренной породы, g							
	[Ambraseys et al., 2005]	[Abrahamson, Silva, 2008]	[Boore, Atkinson, 2008]	[Campbell, Bozorgnia, 2008]	[Ulusay et al., 2004]	[Aydan, 2001]	[Kalkan, Gülkan, 2005]	Среднее
Измир ( $M_L = 5.3$ )	0.12	0.12	—	0.14	0.11	—	0.13	0.125
Урла ( $M_d = 5.6$ )	0.06	0.056	0.068	0.068	0.09	0.05	0.08	0.07
Узункую-Урла ( $M_L = 5.9$ )	0.037	0.029	0.033	0.033	0.06	0.03	0.05	0.04
Моделируемое Измирское ( $M_w = 6.5$ )	0.21	0.34	0.21	0.34	0.20	0.16	0.21	0.24

ются данные [Ambraseys et al., 2005], поскольку большая часть этой базы данных включает данные по турецким землетрясениям. Кроме того, в расчетах ускорения коренных пород используются уравнения затухания, разработанные [Aydan, 2001; Ulusay et al., 2004; Kalkan, Gülkan, 2004] исключительно по данным землетрясений, произошедших на территории Турции. Рассчитанная средняя величина ускорения на уровне коренных пород составляет 0.125 g для Измирского землетрясения 1977 г., а для моделируемого землетрясения в Измирском разломе с использованием вышеуказанных уравнений затухания (табл. 2) ее оценка составляет 0.24 g. Для землетрясений с удаленным эпицентром рассчитанное среднее ускорение грунта на уровне коренных пород составляет от 0.04 до 0.07 g. Эти значения ускорения коренных пород использованы в качестве входных данных при анализе динамической реакции участков на землетрясение.

Составлены послойные разрезы грунтов, достигающие глубины залегания коренных пород (см. рис. 3). Для получения величин эффективных напряжений, используемых при расчете начальных напряжений в грунтовой среде, для каждого местоположения буровых скважин также учитывался уровень грунтовых вод.

Анализ динамической реакции участков на землетрясение выполнялся с использованием программы EERA [Bardet et al., 2000]. Программа EERA используется для расчета одномерного эквивалентного линейного отклика слоев грунта на сейсмические колебания грунта. В методологии эквивалентного линейного отклика нелинейное поведение грунтов при циклически изменяемой нагрузке можно определить с использованием эквивалентного линейного подхода.

Программа EERA рассчитывает отклик почвенного осадка, который аппроксимируется системой гомогенных вязкоупругих слоев бесконечного горизонтального простирания, перекрывающих однородное полупространство (коренную породу), в котором в вертикальном направлении распространяются поперечные волны. Каждый слой является гомогенным и изотропным и характеризуется известными значениями мощности, удельного веса, максимального модуля упругости при сдвиге, а также кривыми снижения модуля сдвига и затухания. Поскольку специальные лабораторные испытания образцов грунта не проводились, кривые снижения модуля сдвига и затухания выбирались на основе имеющейся геотехнической информации и построения соответствующих кривых в данной работе. Для каждого слоя грунта построена собственная модель свойств материала, представляющая параметры изменения модуля упругости ( $G/G_{max}$ ) и коэффициента затухания ( $\xi$ ) в зависимости от деформации при сдвиге в диапазоне 0.0001—10 %. Уменьшение величины модуля сдвига ( $G/G_{max}$ ) в зависимости от деформации при сдвиге ( $\gamma$ ) определено в рамках модели свойств материала. Кривая снижения величины модуля сдвига, построенная по результатам расчетов, используется в начале итерационных шагов в динамическом анализе [Kramer, 1996], та же процедура применяется и к коэффициенту затухания.

При расчете максимальной величины модуля упругости учитывались тип грунта (сыпучий или связный), а также инженерные (напр., эффективное напряжение и сопротивление сдвигу недренированного грунта) и классифицирующие свойства. Для галечников, песков и непластичных илов в зависимости от относительной плотности и среднего эффективного напряжения использовалось уравнение, пред-

ложенное [Seed, Idriss, 1970]. Для связных грунтов использовались формулировки [Hardin, Drnevich, 1972; Vucetic, Dobry, 1991] с учетом коэффициента пластичности ( $PI$ ) и консолидационного отношения слоя грунта. Имеющиеся значения классификационных и инженерных параметров для соответствующих слоев грунта и для конкретной глубины залегания обеспечили возможность выбора соответствующего уравнения для расчета величины максимального модуля сдвига.

Кривые снижения величины модуля сдвига ( $G/G_{\max}$ ) рассчитывались по уравнению [Ishibashi, Zhang, 1993]:

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma, PI)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0}, \quad (1)$$

где

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\}, \quad (1.1)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.00056}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3}), \quad (1.2)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & PI = 0 \\ 3.37 \cdot 10^{-6} PI^{1.404} & \text{для } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \cdot 10^{-7} PI^{1.976} & \text{для } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \cdot 10^{-5} PI^{1.115} & PI > 70 \end{cases} \quad (1.3)$$

Уравнение для расчета коэффициента затухания грунта имеет следующую форму [Ishibashi, Zhang, 1993]:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{1.3})}{2} \left[ 0.586 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right]. \quad (2)$$

Типичные кривые уменьшения модуля сдвига и коэффициента затухания, представляющие основные характеристики грунтов, приведены на рис. 6. Для коренных пород использовались кривые  $G/G_{\max}$  и затухания, рекомендуемые для пород в программе EERA.

При проведении анализа динамической реакции участка на землетрясение нелинейное поведение грунта моделировалось итерациями по скелетным кривым. В начале анализа для каждого слоя грунта значения модуля упругости и коэффициента затухания рассчитывались с использованием имеющихся для данного слоя геотехнических свойств. Начальными входными данными для анализа являлись значения модуля сдвига ( $G$ ) и затухания ( $\xi$ ), соответствующие нижнему порогу деформации. В конце первого итерационного шага рассчитывается первое значение эффективной сдвиговой деформации. Значение модуля сдвига, соответствующее этой сдвиговой деформации, считывается со скелетной кривой, и на следующем итерационном шаге рассчитывается новое значение эффективной сдвиговой деформации. Эквивалентный линейный анализ повторяется с новыми значениями  $G$  и  $\xi$  до тех пор, пока эти значения соответствуют деформации, наведенной во всех слоях. Разность между рассчитанными значениями модуля сдвига и коэффициента затухания для всех слоев на двух последовательных итерациях в процессе расчета снижается до некоторого заранее заданного значения. Обычно

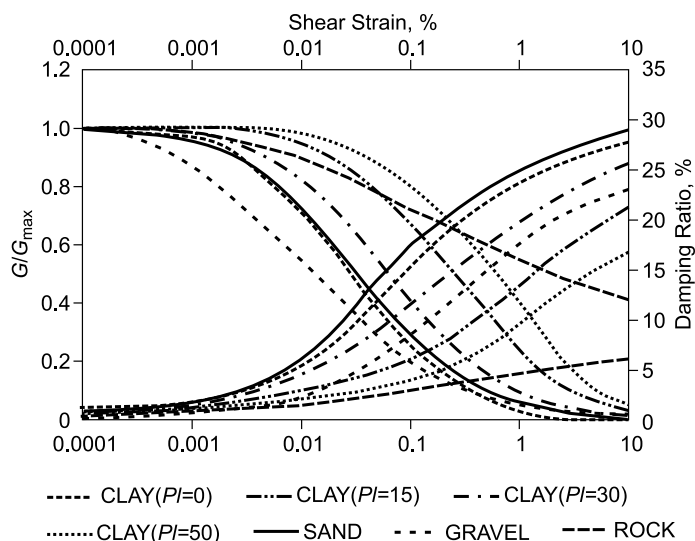


Рис. 6. Типичные кривые  $G/G_{\max}$  и коэффициентов затухания со значениями деформации сдвига, использованные в данной работе.



для достижения сходимости решения достаточно 8—32 итераций. Анализ проводится при постоянном значении декремента затухания, равном 5 %. При достижении сходимости анализ завершается. Сейсмические колебания передаются передаточными функциями от коренных пород к верхним слоям грунта до достижения земной поверхности. Ускорение на глубине залегания коренной породы определяется с использованием вышеописанных моделей затухания. В конце анализа при помощи метода эквивалентного линейного отклика можно рассчитать максимальное ускорение грунта — МУГ (PGA, g), максимальное спектральное ускорение ( $SA_{\max,s}$ , g) и спектральный коэффициент усиления ( $SA_{\max,s}/SA_{\max,r}$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамической реакции участков на землетрясение выполнен с использованием сейсмограмм Измирского 1977 г., Урла 2003 г. и Узункую-Урла 2005 г. землетрясений. Кроме того, было смоделировано землетрясение с магнитудой  $M_w = 6.5$  на восточном и западном сегментах Измирского разлома.

Результаты анализа динамической реакции на землетрясение для Измирского землетрясения 1977 г. ( $M_L = 5.3$ ) показывают, что максимальное ускорение грунта варьирует от 0.21 g на участке Инциральти до 0.34 g на участке IEF (рис. 7). Для землетрясения 1977 г. сеймостанция, расположенная между участками Инциральти и Гюзеляли, зафиксировала значение МУГ на уровне 0.21 g [Ambraseys et al., 2002]. Измеренное во время землетрясения значение ускорения и значения МУГ, рассчитанные для участков Инциральти и Гюзеляли, соответствуют друг другу. Эпицентр Измирского землетрясения 1977 г. находился в 6 км к ЮВ от участков Алсанчак и IEF; это также согласуется с максимальными значениями МУГ, оцененными для этих участков. Результаты данного исследования показывают, что во время Измирского землетрясения 1977 г. районы Алсанчак и Конак испытали МУГ, превышающие 0.3 g.

В TSC [2007] определены конкретные проектные спектры отклика для всех классов локальных участков от Z1 до Z4. На площади проведенных исследований присутствуют участки классов Z3 и Z4. Участки класса Z4 могут быть сложены слоями рыхлого песка, пластичной глины и алевритистой глины с суммарной глубиной залегания более 10 м от земной поверхности; участки класса Z3 состоят из слоев песка и гравия средней плотности, а также слоев среднепластичных и алевритистых глин с суммарной глубиной залегания более 15 м от земной поверхности. Нижний и верхний спектральные характеристические периоды для участков класса Z3 составляют 0.15 и 0.60 с. Участки класса Z4, которым обозначаются намного более слабые грунты, имеют нижний и верхний характеристические периоды 0.20 и 0.90 с соответственно.

Значения спектрального ускорения на земной поверхности, рассчитанные для землетрясений с близкими и удаленными эпицентрами, приведены на рис. 8. Из этого рисунка видно, что спектральные ускорения, зафиксированные в районе Конак, ненамного превышают таковые на спектральном графике для участков класса Z4, к которым относятся территории, сложенные рыхлыми песками и мягкими глинами. Спектральные ускорения в районах Алсанчак и IEF на 54 % превышают соответствующее допустимое ускорение для участков класса Z4, согласно TSC [2007], и достигали величины 1.3 g. При рассмотрении участков класса Z3 проектный спектр охватывает участки Инциральти и Гюзеляли, в которых

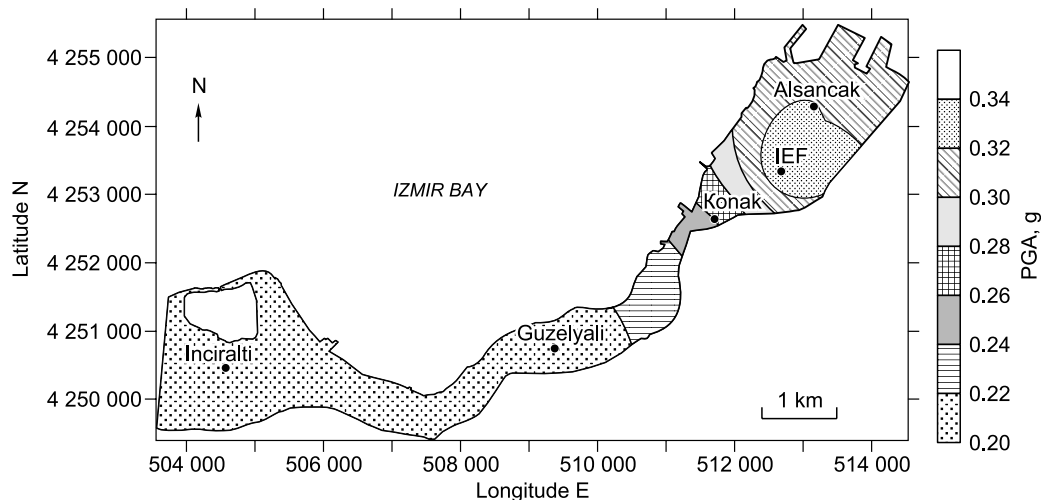


Рис. 7. Максимальное ускорение грунта (g) для Измирского землетрясения 1977 г.

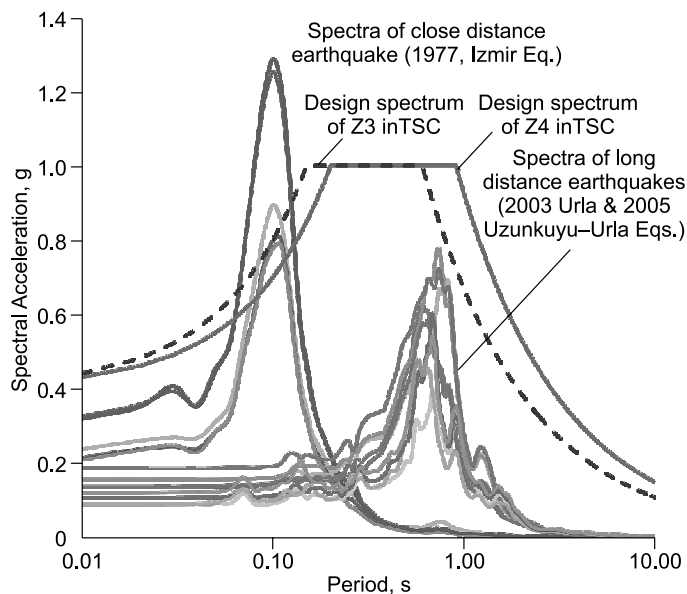
**Рис. 8. Спектры ответного ускорения для землетрясений: Измирского 1977 г., Урла 2003 г., Узункую-Урла 2005 г., и их сравнение с проектными спектрами.**

разрушения конструкций не зафиксированы. Разрушения, наблюдавшиеся в районах Алсанчак и Конак, являются наглядными свидетельствами того, что значения спектрального ускорения превысили соответствующие значения проектного спектра. При рассмотрении фонда сооружений, возведенных к 1977 г., можно констатировать, что основные разрушения пришлось на здания с конструктивными недостатками.

В настоящее время в г. Измир производится более плотная застройка и возводятся более сейсмостойкие сооружения. Землетрясение, аналогичное моделируемому в данной работе, может вызвать еще большие разрушения по сравнению с Измирским землетрясением 1977 г. Анализ динамической реакции на землетрясение показывает, что для моделируемого землетрясения МУГ могут варьировать от 0.40 до 0.66 g. Если разрывается восточный сегмент Измирского разлома, разрушения будут сосредоточены в основном в районе Алсанчак; с другой стороны, если растрескивается западный сегмент, то главные разрушения ожидаются в районе Инциральти (рис. 9). В этом случае МУГ в районе Инциральти будет достигать значения 0.66 g. Усредненные результаты динамического анализа для каждого района площади исследований при моделировании землетрясений, происходящих на восточном и западном сегментах Измирского разлома, приведены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Рис. 10 показывает, что рассчитанные максимальные спектральные ускорения при моделировании землетрясения превышают значения проектного спектра. Видно, что спектральные ускорения в районе Алсанчак (восточный сегмент) и районе Инциральти (западный сегмент) относительно более высокие по сравнению с другими участками, но в целом максимальные спектральные ускорения попадают в интервал 1.5—1.8 g.

Поскольку изучение динамического отклика грунтов при землетрясениях с удаленными эпицентрами является еще одним важным аспектом данного исследования, здесь также обсуждаются результа-

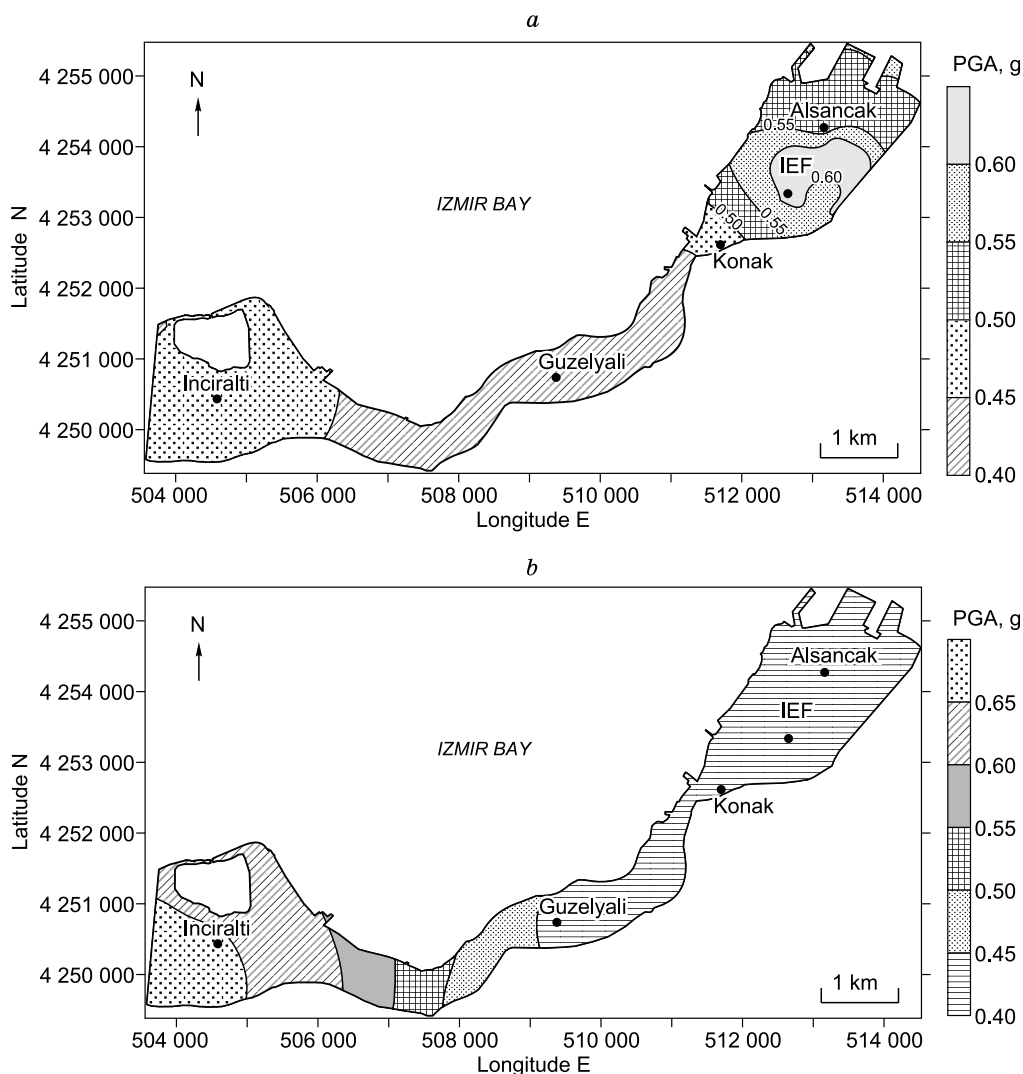


**Таблица 3. Параметры модельного землетрясения на восточном сегменте Измирского разлома ( $M_w = 6.5$ )**

Район	Расстояние от эпицентра, км	Значение ускорения на коренной породе, g	Максимальное ускорение грунта, g	Спектральное ускорение на земной поверхности, g	Спектральное усиление
Алсанчак	6.0	0.30	0.62	2.46	2.41
Международная выставка Измира (МВИ)	6.5	0.30	0.62	2.51	2.47
Конак	8.0	0.28	0.44	1.68	1.76
Гюзеляли	11.5	0.24	0.40	1.63	1.99
Инциральти	16.0	0.19	0.48	1.91	2.96

**Таблица 4. Параметры модельного землетрясения на западном сегменте Измирского разлома ( $M_w = 6.5$ )**

Район	Расстояние от эпицентра, км	Значение ускорения на коренной породе, g	Максимальное ускорение грунта, g	Спектральное ускорение на земной поверхности, g	Спектральное усиление
Алсанчак	15.0	0.19	0.42	1.62	2.51
Международная выставка Измира (МВИ)	14.0	0.20	0.44	1.80	2.78
Конак	12.0	0.25	0.41	1.54	1.81
Гюзеляли	9.0	0.28	0.44	1.81	1.90
Инциральти	5.0	0.30	0.66	2.64	2.59



**Рис. 9. Максимальное ускорение грунта (g) для модельного землетрясения (a) на восточном сегменте, (b) на западном сегменте.**

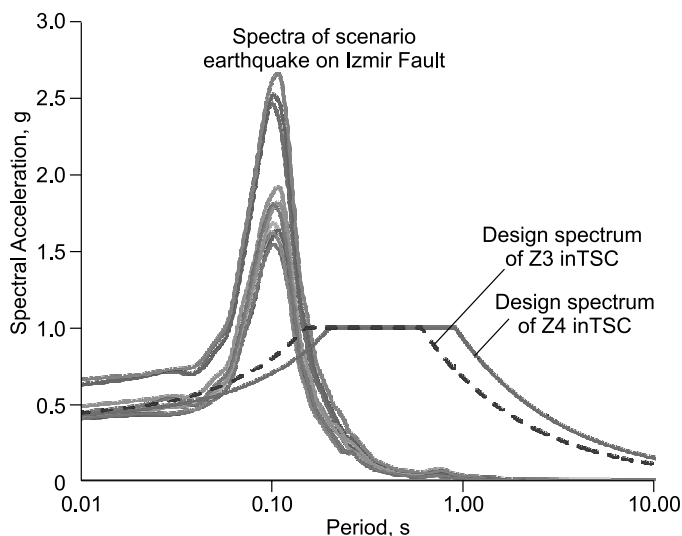
ты землетрясений Урла 2005 г. и Узункюю-Урла 2005 г. Результаты одномерного динамического анализа реакции грунтов на землетрясение показывают, что МУГ находятся в интервале 0.1—0.5 g, а спектральные ускорения — в интервале 0.5—0.8 g. Землетрясения с удаленными эпицентрами порождают более низкие МУГ и спектральные ускорения по сравнению с Измирским землетрясением 1977 г., эпицентр которого располагался относительно близко.

Мощные водонасыщенные слои грунта составляют большую часть площади исследований. Рассчитанный преобладающий период колебаний слоев грунта составляет 0.8—1.3 с. В районах Алсанчак и Конак большая часть зданий, построенных в 1970-е годы, имеет 7—10 этажей, при этом они могут входить в резонанс с преобладающими колебаниями грунта. Наличие таких старых построек, возведенных на мягких/рыхлых грунтах, и относительно высокий период колебаний грунта диктует необходимость исследования резонансного эффекта, возникающего при сильных и умеренных по силе землетрясениях.

Сейсмограммы землетрясения Урла 2003 г. показывают, что при колебаниях грунта преобладали гармоники с большим периодом. При проведении эквивалентного линейного анализа видно, что основная часть энергии этих колебаний приходится на гармоники в интервале 0.70—1.25 с частотного спектра Фурье. Для землетрясения Узункюю-Урла 2005 г. установлены гармоники в интервале 0.5—0.9 с спектра Фурье. Спектральные ускорения на коренных породах и на поверхности земли, которые составляют варианты усиления, были определены по соответствующим спектрам Фурье. Аллювиальные отложения усиливали колебания грунта в 4—5 раз при землетрясениях с удаленным эпицентром (рис. 11),

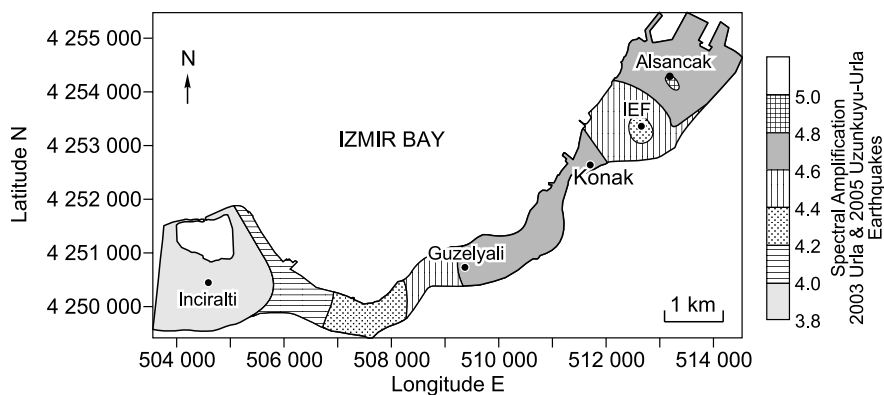
**Рис. 10. Спектры ответного ускорения для моделируемых землетрясений и их сравнение с проектными спектрами.**

характеризующихся гармониками с более высоким периодом по сравнению с Измирским землетрясением 1977 г. (близкорасположенный эпицентр). Измирское землетрясение 1977 г. характеризуется только 2—3-кратным спектральным усилением. Несмотря на то, что моделируемое месторождение имело магнитуду 6.5, усиление, вызванное этим землетрясением, не достигло уровня, характерного для землетрясений с удаленным эпицентром (см. табл. 3, 4).



### ВЫВОДЫ

Динамическое поведение грунтов на площади южного побережья Измирского залива оценено с учетом опасности землетрясения и местных геологических и геотехнических условий. На основании исследований геологических и тектонических условий в районе г. Измир установлено, что Измирский разлом является главным источником сейсмичности в этом регионе. Разлом протягивается параллельно южному побережью Измирского залива, а в недавнем прошлом в зоне этого разлома произошли землетрясения умеренной силы. Также дана оценка источников сейсмичности, относительно удаленных от площади исследований. Выполнен одномерный анализ динамической реакции участков на землетрясение для трех землетрясений средней силы с близкорасположенными и удаленными эпицентрами. Из-за отсутствия данных регистрации сильных землетрясений в районе исследований, для зоны Измирского разлома построена модель землетрясения для проведения анализа динамической реакции участков на землетрясение. Геотехнические данные бурения позволяют определить класс грунтов на исследуемой площади в соответствии с положениями [NEHRP, 2003; TSC, 2007]. Максимальные ускорения грунтов на уровне коренных пород оценены с использованием моделей затухания с учетом сейсмических и тектонических характеристик участков, а также характеристик их коренных пород. Динамические параметры поверхностных слоев грунта, такие как максимальное ускорение грунта, спектральное ускорение и спектральное усиление, рассчитаны с учетом результатов анализа динамической реакции участков на землетрясение, проведенного для каждого разреза грунта. Данные построенных моделей разрезов грунтов до уровня коренных пород использованы для проведения эквивалентного линейного анализа. Для каждого разреза грунта рассчитаны максимальное ускорение грунта, спектральное ускорение и коэффициент усиления, и эти значения закартированы. Основные выводы, сделанные на основании результатов исследования, кратко изложены ниже.



**Рис. 11. Изменение (спектрального) усиления от землетрясений Урла 2003 г. и Узункую-Урла 2005 г.**

Если рассматривать землетрясения умеренной силы и моделируемые колебания грунта, то районы Алсанчак и Инциральти г. Измир, являющиеся примерами городских застроек, расположенных на мощных толщах рыхлых и водонасыщенных аллювиальных отложений, подвержены повышенному сейсмическому риску. Анализ моделируемого землетрясения, произошедшего в восточном сегменте Измирского разлома ( $M_w = 6.5$ ), показывает, что МУГ могут достигать значений 0.40—0.62 g в средней части (Гюзеляли—Конак) и на восточной границе (Алсанчак) площади исследований соответственно. Минимальные рассчитанные значения МУГ относятся к участку Гюзеляли, где глубина залегания коренных пород меньше (10—30 м). Результаты моделирования землетрясения в западном сегменте Измирского разлома ( $M_w = 6.5$ ) показывают, что максимальные значения МУГ (0.66 g) достигаются у западной границы (Инциральти) площади исследований. При моделировании землетрясения максимальные спектральные ускорения попадают в интервал 1.5—1.8 g. Спектральное усиление варьирует от 1.8 до 3.0.

Оценка спектрального усиления показывает, что преобладающие максимальные величины ускорения являются результатом землетрясений с удаленными эпицентрами. При этом в прибрежной зоне площади исследований, где степень заселения выше, усиление колебаний грунта в целом возрастает в 3.8—5.2 раза. Основными факторами усиления колебаний грунта являются наличие рыхлых аллювиальных отложений и высокий уровень залегания грунтовых вод в районе.

Сравнение проектного спектра с рассчитанными спектрами отклика показывает, что нижние значения характеристических периодов превышаются при землетрясении, имеющем близкорасположенный эпицентр. Спектральные ускорения приближаются к верхней границе проектного спектра в соответствии с характеристиками землетрясения с удаленным эпицентром, рассмотренными в данной работе. Если происходит удаленное землетрясение большей магнитуды, верхняя граница проектного спектра может быть превышена.

С учетом вышесказанного, следует подчеркнуть, что каждый участок изучаемой площади характеризуется своими специфическими глубинными условиями, которые должны оцениваться индивидуально. Для территорий, сложенных мощными аллювиальными отложениями, рекомендуется составлять индивидуальные проектные спектры для каждого участка.

Поскольку площадь исследований в настоящее время уже достаточно плотно заселена, и при непрерывном росте населения требуются все новые площади для застройки, результаты данного исследования могут служить полезным руководством при оценке локальных сейсмических условий данной территории и других районов мира с похожими геологическими и геотехническими характеристиками. Необходимые для дальнейшего планирования строительства в регионе дополнительные измерения можно определить по картам, построенным в ходе данного исследования.

Данная работа, посвященная исследованию южной части г. Измир и его окрестностей, показывает всю важность построенных карт МУГ и усиления их колебаний, которые отражают изменения, связанные с динамическим поведением грунтов. Имея в своем распоряжении карты конкретных участков, инженеры-строители смогут выбирать соответствующие безопасные конфигурации для своих конструкций.

## ЛИТЕРАТУРА

**Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебrenников С.П., Брыжак Е.В., Дреннова Н.Н.** Спектры ускорений колебаний, возбуждаемых землетрясениями юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2013, т. 54(2), с. 292—301.

**Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.А.** Закономерности проявления и модели локализации опасных геологических процессов при сейсмогенной активизации разломов на юге Сибири и в Монголии // Геология и геофизика, 2014, т. 55(8), с. 1294—1313.

**Abik Ş., Kaftan İ., Geçim E., Polat O.** Seismic hazard assessment of Izmir vicinity by using the Hurst algorithm. International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Regions, IESCA, Izmir-Turkey, 2005, 243 p.

**Abrahamson N., Silva W.** Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground motion relations // Earthquake Spectra, 2008, v. 24(1) p. 67—97.

**Ambraseys N.N., Finkel C.F.** The seismicity of Turkey and adjacent areas. A historical review: 1500-1800, Eren Publications, Istanbul, 1995, 125 p.

**Ambraseys N.N., Smit P., Sigbjornsson R., Suhadolc P., Margaris B.** Internet-site for European strong-motion data, EVR1-CT-1999-40008. European Commission, Research-Directorate General XII, Environment and Climate Programme, Bruxelles, Belgium, 2002, [www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/frameset.htm](http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/frameset.htm)

**Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K., Smit P.M.** Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration // Bull. Earthquake. Eng., 2005, v. 3 (1), p. 1—53.

**Aydan O.** Comparison of suitability of submerged tunnel and shield tunnel for subsea passage of Bosphorus // *Jeoloji Mühendisliği*, 2001, v. 25 (1), p. 1—17.

**Bardet J.P., Ichii K., Lin C.H.** EERA — a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits. University of Southern California, Department of Civil Engineering, August 2000.

**Bjerrum L.W., Atakan K.** Scenario based ground motion simulations for assessing the seismic hazard in Izmir, Turkey. Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12—17, 2008, Beijing, China, 2008, № 121.

**Boore D.M., Atkinson G.M.** Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5 %-damped PSA at spectral periods between 0.01 s to 10 s // *Earthquake Spectra*, 2008, v. 24(1) p. 99—138.

**Bozkurt E.** Neotectonics of Turkey — a synthesis // *Geodinamica Acta*, 2001, v. 14, p. 3—30.

**Bozkurt B.H.** 2010. A geotechnical earthquake engineering investigation in the southern coast of Izmir Bay Area; MSc Thesis, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Izmir, Turkey, 119 p.

**BU KOERI.** Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Earthquake Catalogue, 2012, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo>

**Campbell K.W., Bozorgnia Y.** Next Generation Attenuation (NGA) empirical ground motion models: can they be used in Europe? // Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 2006, № 458.

**Campbell K.W., Bozorgnia Y.** NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5 % damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s; *Earthquake Spectra*, 2008, v. 24(1) p. 139—171.

**DEMPE-ED.** Republic of Turkey, Prime Ministry, Disaster and Emergency Management Presidency, Earthquake Department, National Strong Motion Observation Network, 2012, <http://www.kyh.deprem.gov.tr/buyukdepremen.htm>

**Eker A.M., Akgun H., Kockar M.K.** Local site characterization and seismic zonation study by utilizing active and passive surface wave methods: A case study for the northern side of Ankara, Turkey // *Engin. Geol.*, 2012, v. 151, p. 64—81.

**Emre O., Ozalp S., Dogan A., Ozaksoy V., Yildirim C., Goktas F.** Active faults and earthquake potentials in the vicinity of Izmir, Mining Technical and Exploration Institute, Geological Investigations Department, 2005, Report № 10754, 86 p.

**Erdik M., Durukal E.** Strong ground motion // Ed. A. Ansal. Recent advances in geotechnical earthquake engineering / Kluwer Academic Publishers. Chapter 3. 2004, p. 67—100.

**Erdik M., Ansal A., Aydinoglu N., Barka A., Isikara A.M., et al.** RADIUS (Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters) Project final report: earthquake scenario and master plan for the city of Izmir. Bogazici University, Istanbul, in Turkish, 1999, <http://www.Izmir.bel.tr/Izmirdeprem/Izmirrapor.htm>

**Erdogan B.** Stratigraphic Properties and Tectonic Evolution of Izmir-Ankara Suture Zone between Izmir and Seferihisar, Bulletin of Turkish Petroleum Geologists Association (TPJD Bulteni) 1990, v. 2(1), p. 1—20.

**GEDIK.** Ltd. Co., Geological and Geotechnical Reports of Southern Izmir. 2012.

**Hardin B.D., Drnevich V.P.** Shear modulus and damping in soils: design equations and curves // *J. Soil Mech. Found. Divis., ASCE*, 1972, v. 98(1) SM7, p. 667—692.

**Hurst H.E.** Long-term storage capacity of reservoirs // *Amer. Soc. Civil Eng. Trans.* 1951, v. 2447, p. 770—808.

**Ishibashi I., Zhang X.** Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found.*, 1993, v. 33 (1), p. 182—191.

**Kalkan E., Güllkan P.** Empirical attenuation equations for vertical groundmotion in Turkey. *Earthquake Spectra*, 2004, v. 20 (3), p. 853—882.

**Kincal C.** Evaluation of units around Izmir Inner Bay with respect to engineering geology by using geographic information systems and remote sensing techniques. PhD Thesis, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Izmir, Turkey, 2005, 342 p.

**Kincal C., Koca M.Y.** A proposed method for drawing the great circle representing dip angle and strike changes, *Environ. Enginee. Geosci.*, 2009, v. 15(3) p. 145—165.

**Koca M.Y.** Slope stability assessment of the abandoned andesite quarries in and around the Izmir City centre. PhD Thesis, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Izmir, Turkey, 1995, 430 p.

- Koca M.Y., Kincal C.** Abandoned stone quarries in and around the Izmir City center and their geoenvironmental impacts — Turkey // *Engin. Geol.*, 2004, v. 75, p. 49—67.
- Koçkar M.K., Akgun M.** Evaluation of the site effects of the Ankara basin, Turkey // *J. Appl. Geoph.*, 2012, v. 83, p. 120—134.
- Kramer S.L.** Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1996, NJ, p. 653.
- NEHRP.** Recommended provisions for seismic regulations for new buildings, FEMA 450, 2003.
- Pitilakis G.** Site effects, recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation / Ed. A. Ansal // Springer Netherlands, 2004, p. 139—197.
- Polat O., Gök E., Yılmaz D.** Earthquake hazard of the Aegean Extension Region (West Turkey) // *Turkish J. Earth Sci.*, 2008, v. 17, p. 593—614.
- Seed H.B., Idriss I.M.** Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. California, Berkeley, 1970.
- Sozibilir H., Uzel B., Sumer O., Inci U., Ersoy E., Kocer T., Demirtas R., Ozkaymak C.** Data about coordinated working of the E-W oriented Izmir Fault and the NE-SW oriented Seferihisar Fault: Kinematical and paleoseismological studies on active faults occurring gulf of Izmir, Western Anatolia // *Bull. Turkish Geol.*, 2008, v. 52(2), p. 91—114.
- Sozibilir H., Sumer O., Uzel B., Ersoy E., Erkul F., Inci U., Helvaci C., Ozkaymak C.** Seismic geomorphology of October 17—20, 2005 Sigacik Bay earthquakes and relation with stress areas in region, Western Anatolia // *Bull. Turkish Geol.*, 2009, v. 53(2), p. 217—238.
- Stafford P.J., Strasser F.O., Bommer J.J.** An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region // *Bull. Earthquake Engin.*, 2008, v. 6, p. 149—177.
- TSC.** Turkish Seismic Code (revised), Republic of Turkey, Prime Ministry, Disaster and Emergency Management Presidency, Ankara, 2007, <http://www.deprem.gov.tr/>
- TUBITAK 106G159.** Modelling of seismic behaviour of soils for safe design of buildings against earthquakes in Izmir Province, Aliaga and Menemen Districts. Research Project Report prepared by Dokuz Eylul University Earthquake Research and Application Centre, Izmir, 2012.
- Ulusay R., Tuncay E., Sonmez H., Gokceoglu C.** An attenuation relationship based on Turkish strong ground motion data and iso-acceleration map of Turkey // *Eng. Geol.*, 2004, v. 74, p. 265—291.
- Uzel B., Sozibilir H., Ozkaymak C.** Evolution of an actively growing superimposed basin in Western Anatolia: The Inner Bay of Izmir, Turkish // *J. Earth Sci.*, 2012, v. 21(4), p. 439—471.
- Vucetic M., Dobry R.** Effect of soils plasticity on cyclic response // *J. Geotech. Engin.*, ASCE, 1991, v. 117(1), p. 898—907.
- Wells D.L., Coppersmith K.J.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1994, v. 4 (84), p. 975—1002.
- Yalcin I.A.** A geotechnical earthquake engineering investigation in the southeastern coast of Izmir Bay Area, M.Sc. Thesis, Dokuz Eylul University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Izmir, Turkey, 2008, 159 p.

*Рекомендована к печати 29 января 2015 г.  
В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию 13 марта 2013 г.,  
после доработки — 26 марта 2014 г.*