

## Уточнение исходной сейсмичности района Керченского пролива

### Seismic hazard assessment of the Kerch Strait area

*В работе проведен анализ сейсмической опасности района Керченского пролива с использованием вероятностного метода. Изучены зарубежные и отечественные источники и составлена база землетрясений, включающая 176 событий, произошедших в радиусе 100 километров от пролива. Учтено наличие в базах землетрясений форшоков и афтершоков. Выявлены пять сейсмогенерирующих зон в виде сейсмогенных поверхностей, равномерно распределенных по глубине и точечных источников и указаны их основные характеристики. Для оценки полноты баз данных для каждой из зон использован метод Степа. В качестве зависимости между числом землетрясений и магнитудой применялся закон Гуттенберга-Рихтера. Проведено сравнение полученных значений пиковых ускорений на поверхности со значениями, рассчитанными согласно картам ОСР-2016 и СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах». Получены графики изменения пикового ускорения грунта по глубине с использованием линейного эквивалентного метода.*

*Ключевые слова: сейсмичность, Керченский пролив, вероятностный метод, сейсмогенные зоны, линейный эквивалентный метод*

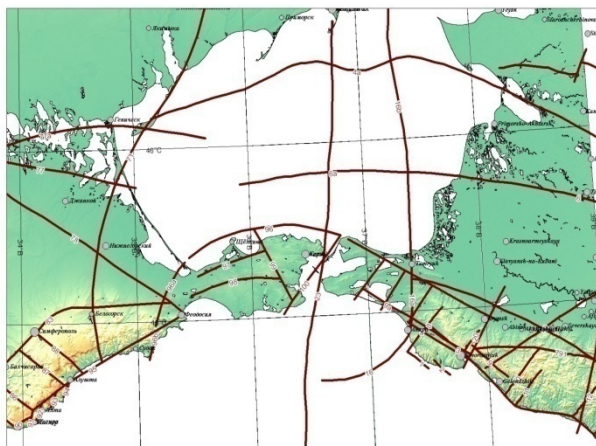
*The work analyzes the seismic hazard in the Kerch Strait area using the probabilistic method. Foreign and domestic sources have been studied and a database of earthquakes has been compiled, including 176 events that occurred within a radius of 100 kilometers from the strait. The presence of foreshocks and aftershocks in the earthquake databases was taken into account. Five seismogenerating zones in the form of seismogenic surfaces uniformly distributed in depth and point sources are identified and their main characteristics are indicated. To assess the completeness of databases for each of the zones, the Step method is used. As a relationship between the number of earthquakes and the magnitude, the Gutenberg-Richter law was applied. The obtained values of peak accelerations on the surface are compared with the values calculated according to the maps ОСР-2016 and SP 14.13330.2014 "Construction in seismic regions". The plots of the changes in the peak acceleration of the soil in depth are obtained using linear equivalent method.*

*Key words: seismicity, Kerch Strait, probabilistic method, seismogenic zones, linear equivalent method*

Согласно картам ОСР-2016 район Керченского пролива входит в число наиболее сейсмически опасных районов России и характеризуется высокой современной тектонической активностью, проявляющейся преимущественно в «...деформациях молодых геологических образований, грязевом вулканизме и движениях земной поверхности» [5].

Многочисленные источники [1,2,4,5,6] свидетельствуют о значительном количестве произошедших за последние 100 лет землетрясений в регионе, однако, их магнитуда не превышает 5.5 – 5.7. Высокая сейсмическая опасность района, прежде всего, обусловлена большим количеством потенциально опасных разломов (Рисунок 1) и разрушительными землетрясениями прошлого магнитудой до 7.5.

Несмотря на огромную проделанную работу при создании карт ОСР, они не могут учитывать местную специфику площадки строительства, и потому, согласно СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах», необходимо уточнять исходную сейсмичность и проводить сейсмическое микрорайонирование.



**Рисунок 1 Активные разломы в районе Керченского пролива**

Для оценки сейсмической опасности применяются два метода: вероятностный и детерминистский. У каждого из подходов есть свои плюсы и минусы, однако, в случае присутствия значительных неопределенностей в исходной информации, вызванных малым периодом наблюдения за районом, вероятностный метод имеет преимущество.

Сущность вероятностного метода оценки сейсмической опасности района заключается в вычислении вероятности  $\lambda$ , при которой уровень колебаний грунта  $A_0$  будет достигнут или превышен величиной  $A$  [9,10]:

$$\lambda(A \geq A_0) = \sum_{i=1}^{n_{source}} v_i \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P[A(m, r) \geq A_0 | m_j, r_k] P(M_i = m_j) P(R_i = r_k)$$

где  $f_{M_i}(m)$  - функция плотности вероятности магнитуд, которая описывает вероятность события с магнитудой заданной в определенных пределах;

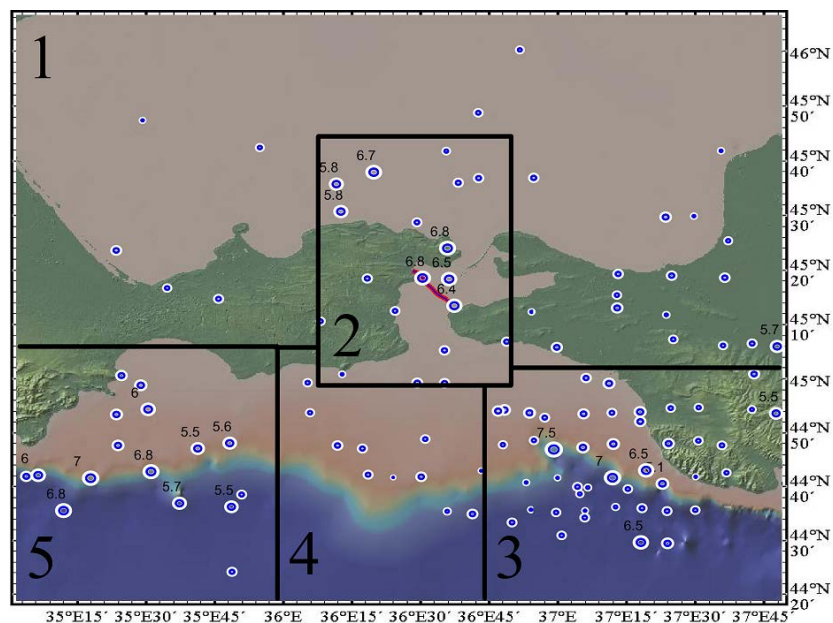
$f_{R_i}(r)$  - функция плотности вероятности расстояния от гипоцентра до исследуемого участка;

$P[A(m, r) \geq A_0 | m, r]$  - вероятность превышения пикового ускорения  $A_0$ , в случае, если землетрясение магнитудой  $m$  произошло на расстоянии  $r$ . Данная функция зависит от выбранной модели затухания колебаний;

$v_i$  - частота возникновения землетрясений магнитудой больше минимальной  $m_{min}$  для отдельного источника  $i$  из общего числа источников  $N_s$ .

База данных землетрясений была собрана с использованием российских и зарубежных источников [1,2,4,5,6]. В нее вошли данные как инструментальных наблюдений за последние 50 лет, так и исторические данные. Она была проверена на совпадения, наличие афтершоков, форшоков и в результате включает в себя 176 землетрясений.

Территория вокруг Керченского пролива была разбита на несколько сейсмогенерирующих зон для каждой из которых число зафиксированных землетрясений варьируется от 25 до 50. Карта с указанием, полученных 5 сейсмогенерирующих зон, показана на рисунке 2.



**Рисунок 2 Карта сейсмогенерирующих зон, с указанием расположения эпицентров землетрясений и их магнитуды**

В таблице 1 представлена исходная информация по каждой зоне: для сейсмогенных поверхностей и точечных источников.

Таблица 1 - Исходная информация для сейсмогенных зон

Номер сейсмогенной зоны	Тип разлома	Максимальная ожидаемая магнитуда	Минимальная ожидаемая магнитуда	Скорость деформаций, мм/год (в скобках расчетная)	Площадь разлома Км <sup>2</sup>	Глубина, км
1	сбросо-сдвиговой	5.2	4.5	2.1	17.5	8-50 (24)
		6			93	-
2	сдвиговой	6.5		2.1 (2.0)	266	8-50 (24)
		7.5			1422	-
3	сбросо-сдвиговой	6.5		2.1 (5.7)	266	8-50 (24)
		7.5			1422	-
4	сбросо-сдвиговой	5.5		2.1 (2.3)	33	8-50 (24)
5	сбросо-сдвиговой	6		2.1 (3.3)	93	8-50 (24)
		7			758	-

В качестве зависимости между числом землетрясений и магнитудой применялся закон Гуттенберга-Рихтера (G–R) [7,9,10]:

$$\text{Log}(N) = a - bm$$

где  $m$  – магнитуда;

$N$  – число событий магнитудой равной или большей выбранной « $m$ »;

$a$  и  $b$  – константы, которые зависят от  $m$  и  $N$ .

В таблице 2 представлены полученные методом наименьших квадратов значения параметров  $a$  и  $b$  для каждой из зон с указанием 95% доверительного интервала.

Таблица 2 – Значения параметров  $a$  и  $b$  для каждой зоны

Номер сейсмогенной зоны	Параметр $a$	Параметр $b$
1	1.797	0.609
	$\pm 0.166$	$\pm 0.0451$
2	2.02	0.658
	$\pm 0.415$	$\pm 0.075$
3	6.659	1.914
	$\pm 0.717$	$\pm 0.134$
4	3.511	1.086
	$\pm 0.571$	$\pm 0.1616$
5	2.416	0.8153
	$\pm 0.668$	$\pm 0.1149$

Для расчета была принята модель затухания колебаний в грунте предложенная S. Akkar (2014) [7,8], поскольку она отвечает требованиям по максимальной и минимальной магнитуде, расстоянию до эпицентра, глубине, полноте использованной при создании базы данных землетрясений и точности получаемых результатов в сравнении с другими моделями.

Расчет проводился для скального грунта с сейсмической жесткостью 1500 т/м·с, поскольку это повышает точность при использовании эмпирических моделей затухания колебаний в толще грунта [12]. В дальнейшем значения пикового ускорения грунта строительной площадки (Рисунок 3) были получены с использованием линейного эквивалентного метода расчета слоев грунта на сейсмическое воздействие и кривых зависимости динамических параметров грунта «GeoIndex Model» [11].

Расчет слоев грунта проводился с использованием нормализованных акселерограмм 10 землетрясений, чьи эпицентры были расположены в зоне 2. Для дальнейшего расчета было выбрано среднее значение 10 пиковых ускорений и максимальное значение из 10 пиковых ускорений.

На рисунке 4 показан график зависимости периода повторяемости землетрясений от пикового ускорения для наиболее и наименее опасных участков площадки строительства.

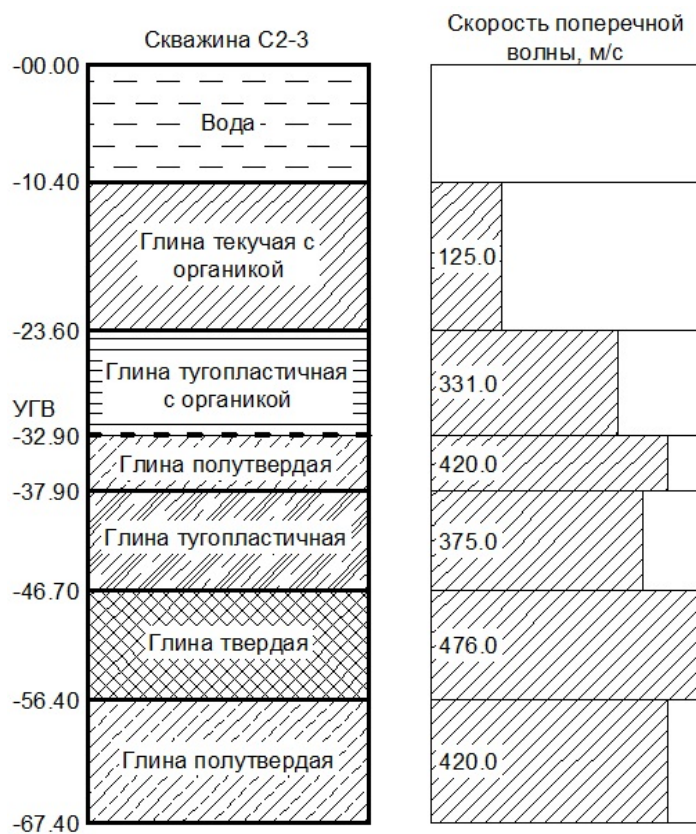


Рисунок 3 Схема скважины С2-3 с указанием скорости поперечной волны в грунте

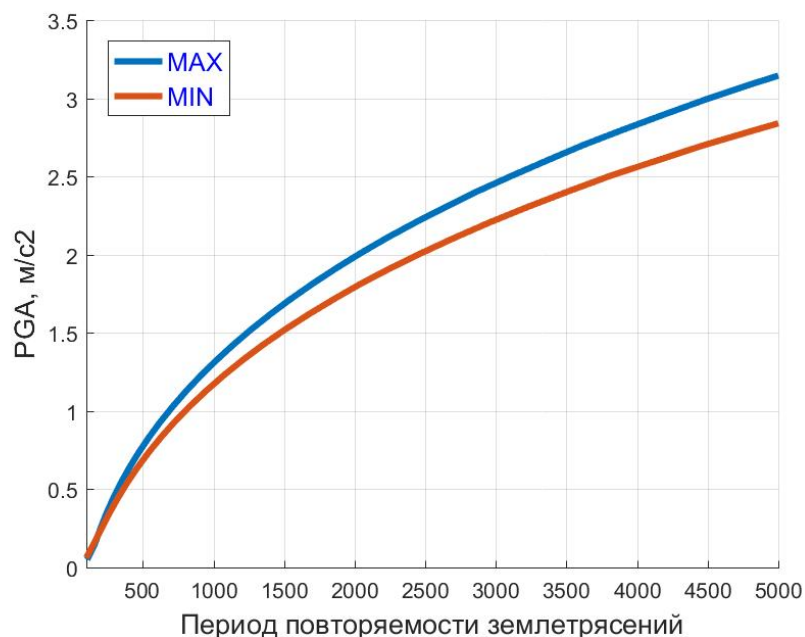


Рисунок 4 Зависимость периода повторяемости землетрясений от пикового ускорения

Поскольку сравнение полученных результатов расчета будет вестись со значениями пикового ускорения в данном регионе согласно картам ОСР-2016, то необходимо, прежде всего, определить пиковое ускорение грунта согласно нормам СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах».

В таблице 3 представлены данные по району Керченского пролива в соответствии с картами ОСР-2016 и положением (Г.3.17) СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» о поправочном коэффициенте «К<sub>3</sub>» на динамические свойства расчетной грунтовой толщи.

Таблица 3 – Данные по району Керченского пролива

Карта ОСР – 2016	А	В	С
Вероятность превышения	10%	5%	1%
Период	50 лет	50 лет	50 лет
Балл	8	8-9	9
PGA, м/с <sup>2</sup>	2.0	4.0	4.0
PGA*K <sub>3</sub> , м/с <sup>2</sup>	2.39	4.79	4.79

В таблице 4 представлены результаты проведенного расчета для скального грунта и поверхности строительной площадки с сейсмическими жесткостями 1500 т/м·с и 458 т/м·с соответственно.

Таблица 4 – Результаты проведенного расчёта

		Пиковое ускорение поверхности грунта, м/с <sup>2</sup>		
Вероятность превышения		10%	5%	1%
Скальный грунт		0.8	1.3	3.2
Грунт строительной площадки	среднее значение	2.5	3.1	4.1
	максимальное значение	2.8	3.6	5.5

Поскольку при строительстве моста через Керченский пролив используется свайный фундамент, то большой интерес представляют значения пикового ускорения для разных слоев грунта (Рисунок 5).

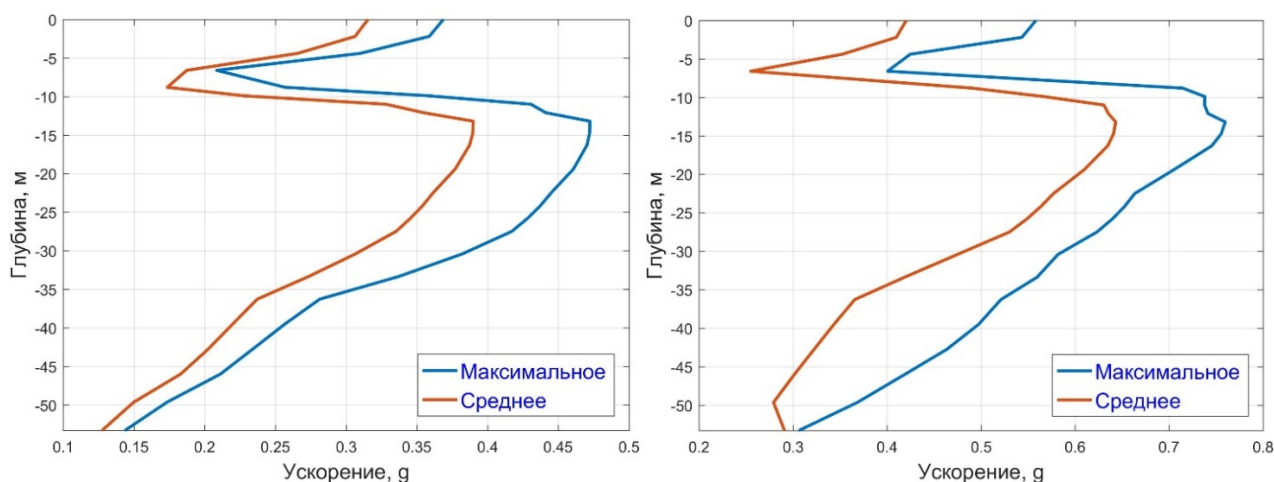


Рисунок 5 – Графики изменения пикового ускорения грунта по глубине для 5% и 1% вероятности превышения соответственно

На рисунке 5 хорошо заметно, значительное снижение пикового ускорения грунта на глубине 8 – 10 м. Это объясняется резким перепадом в скорости поперечной волны (Рисунок 3) и как следствие изменением резонансной частоты колебания грунта. Данный эффект проиллюстрирован на рисунке 6, где показаны графики отношения амплитудных спектров Фурье акселерограмм полученных на разных глубинах и исходной акселерограммы. Поскольку доминирующей частотой для акселерограммы на глубине 13.2 м. является 1.1 Hz (Рисунок 7), а на глубине 8.8 м. данная частота затухает (Рисунок 6), то происходит резкое снижение значения пикового ускорения.

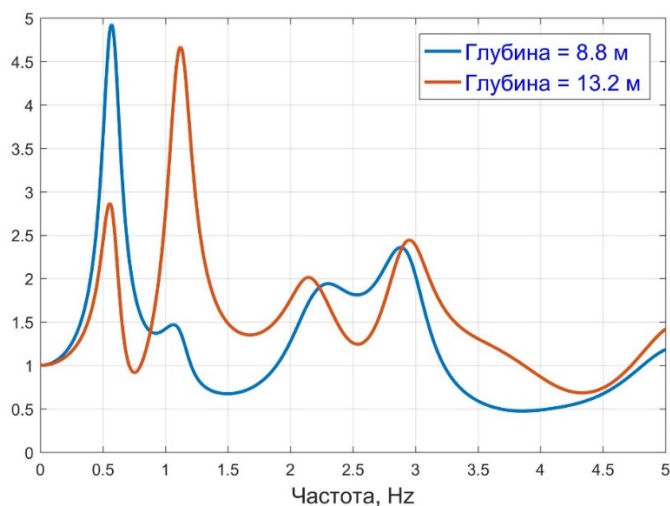


Рисунок 6 – Графики отношения амплитудных спектров Фурье

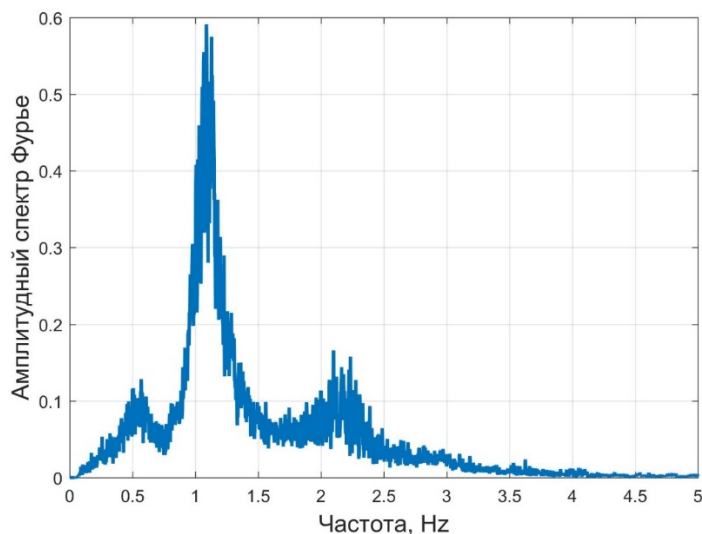


Рисунок 7 – Амплитудный спектр Фурье акселерограммы на глубине 13 м

### Выводы

Полученные результаты расчета показывают большие пиковые ускорения грунта, чем те, которые получены согласно картам ОСР-2016 и СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах». Однако следует учитывать, что это, прежде всего, вызвано наличием слабых грунтов в зоне строительства. Данные грунты увеличивают пиковые значения ускорения колебаний более чем в два с половиной раза, что согласно СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах», должно учитываться поправочным коэффициентом  $K_3$ . Как, однако было отмечено [3], данная формула вносит в расчет

значительные погрешности, что приводит к заниженным результатам при определении пикового ускорения

Расчет слоев грунта на сейсмическое воздействие показал значительные перепады пикового ускорения по глубине, вызванное скачками в скорости распространения поперечной волны в грунте. В дальнейшем это может негативно сказаться на работе свайного фундамента.

В работе была рассмотрена одна скважина, которая не может в полной мере характеризовать площадку строительства протяженностью 20 км. В случае проведения более полного анализа также необходимо учитывать возможность разжижения грунта, поскольку на других участках присутствуют песчаные грунты, которые при столь значительных ускорениях грунта могут подвергнуться разжижению. Присутствие сравнительно мощного верхнего слоя слабого грунта, обуславливает необходимость проведение двумерного расчета с целью учета влияния поверхностных волн.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров Н.И. и др. К оценке сейсмической опасности района керченского пролива по данным археосейсмологии / Вопросы инженерной сейсмологии, Т. 42, М.: 2015, с. 51 - 66
2. Габсатарова И. П., Малянова Л. С., Селиванова Е. А., Якушева В. Н. Землетрясение 10 декабря 2012 года с  $M_w = 4.6$  вблизи г. Анапы / Сейсмологическая бюллетень Украины, 2013, с. 35-45
3. Курбацкий Е.Н., Косауров А.П. К вопросу о пересчете балльности в ускорения колебаний грунта / Инженерная сейсмология, №14, Москва, 2016, стр. 50 – 60
4. Никонов А.А. Главные особенности геодинамики, напряженного состояния и распределения сильных землетрясений в азово-черноморском регионе / Труды четвертой тектонофизическая конференция в ИФЗРАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле, М.:2016, с. 493 - 501
5. Овсученко А. Н., Корженков А. М., Ларьков А. С., Мараханов А. В., Рогожин Е. А. Новые сведения об очагах сильных землетрясений в районе Керченского полуострова по палеосейсмологическим данным / Доклады академии наук, том 472, № 1, М.:2017, с. 89–92
6. Уломов В.И., Медведева Н.С. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации [Электронный ресурс] / Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН, URL: [www.seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf](http://www.seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf) (дата обращения 26.05.2017)
7. AkkarS., SandıkkayaM. A., Bommer J. J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the middle east / Springer Science, Bulletin of Earthquake Engineerin, 2013
8. John D. Ground motion prediction equations 1964-2016 [Электронный ресурс] // Department of Civil and Environmental Engineering University of Strathclyde, UK, URL: [www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.pdf](http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.pdf) (дата обращения 26.05.2017)
9. Jessica G. Probabilistic seismic hazard analysis – an introduction to theoretical basis and applied methodology [Электронный ресурс] // URL: [www.roseschool.it/files/get/id/4440](http://www.roseschool.it/files/get/id/4440) (дата обращения 26.05.2017)
10. Jack W. B. An introduction to probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) [Электронный ресурс] // URL:



[https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker \(2008\) Intro to PSHA v1 3.pdf](https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker (2008) Intro to PSHA v1 3.pdf)

(дата обращения 26.05.2017)

11. Roblee C.J., Chiou S.J. The geindex model for practical design selection of non-linear soil properties / 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1630, 2006, USA, 11 с.
12. Stewart P.J., Hashash M.A. Guidelines for performing hazard-consistent one-dimensional ground response analysis for ground motion prediction // PEER Report 2014 Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarters, University of California at Berkeley, USA, 152 с.

**Косауров Артем Петрович**

кафедра «Мосты и тоннели» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МГУПС(МИИТ))

Аспирант

Г. Истра, ул. Ленина, д. 4б, кв. 36

Тел: 8 925 792 94 23

E-mail: artkp14@mail.ru