

УДК 550.34.01

СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК КРУПНЕЙШИХ ГОРОДОВ МИРА: ПРОВЕРКА ОЦЕНОК

Т.Л.Кронрод, А.К.Некрасова

*Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук*

Работа посвящена сопоставлению теоретических оценок сейсмического риска крупнейших городов мира, полученных в работе В.И.Кейлис-Борока, Т.Л.Кронрод, Г.М.Молчана (1984 г.) на период 1971–2000 гг., с фактическим ущербом от землетрясений за последние 25 лет. Рассмотрены два эффекта сильных землетрясений: число городов N_t и число их жителей D_t в зоне катастрофических сотрясений. Получено хорошее согласие прогноза числа пострадавших городов с числом реальных сотрясений за 25 лет (прогноз 6.7 ± 3.2 , пострадало 6 или 7 – нет точных данных о Киото). Данные о численности населения в зоне сильных сотрясений отсутствуют, однако достоверность прогноза D_t косвенно подтверждается сопоставлением расчетной численности населения на 1990 г. с фактической людностью. Показано, что мировые процессы агломерирования городов и образования мегалополисов качественно меняют проблему риска городского населения и экономики страны.

SEISMIC RISK FOR THE WORLD'S GREAT CITIES: COMPARISON WITH OBSERVATIONS

T.L. Kronrod and A.K. Nekrasova

*International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences*

Seismic risk estimations for the largest cities for the period 1971–2000 (Keilis-Borok, Kronrod, and Molchan, 1984) are compared with the actual loss from earthquakes for the last 25 years. Two effects of large earthquakes are considered: number of cities N_t and their population D_t in the area of catastrophic shaking. The forecast of the number damaged cities for the 25 years (6.7 ± 3.2) is in good agreement with the observations (6 or 7 – there is no certainty about Kyoto). There are no data about the population in the strong shaking area, but the reliability of the forecast is corroborated by a comparison of the supposed population of these cities in 1990 with the real numbers. It is shown that the agglomeration of cities and growth of megalopolises over the world essentially affect the seismic risk for population and economy.

ВВЕДЕНИЕ

В работе В.И. Кейлис-Борока, Т.Л. Кронрод, Г.М. Молчана [1] были получены оценки сейсмического риска крупнейших городов мира на 1971–2000 гг. по методике, разработанной авторами [2]. Исследовались две меры риска: число городов N_t

и число их жителей D_t , которые могут оказаться в зоне катастрофических событий в течение 30 лет.

В данной работе проведена проверка указанных оценок риска на материале независимых сейсмологических наблюдений и демографических данных. Расчетные оценки для числа пострадавших городов N_t сравниваются с числом реальных сотрясений за последние 25 лет для трех классов городов с разным уровнем сейсмической опасности. О подтверждении оценок эффекта D_t мы судим косвенно – путем анализа расчетных демографических параметров.

В работе [1] было рассмотрено 76 городов с населением от 0.8 млн человек по состоянию на 1970 г. Из анализа были исключены города Китая из-за отсутствия демографических данных и 36 городов в районах слабой сейсмичности.

Оценки относились к катастрофическим событиям: сотрясениям интенсивностью $I \geq VIII$ ММ на площади не менее 100 кв. км. В расчетах не учитывались локальные грунтовые условия и пространственные размеры городов из-за невысокой точности границ сейсмогенных районов, обобщенности сейсмологических моделей и неопределенности границ городских агломераций.

Расчеты оценок риска основаны на Пуассоновской модели последовательности землетрясений и вероятностной модели изосейст. Параметры закона повторяемости в крупных сейсмогенных районах оценивались для нормальных землетрясений ($h < 60$ км) с магнитудой $M \geq 5$ по инструментальным данным до 1974 г. с исключенными афтершоками; дополнительные оценки параметров были получены по полному каталогу. Модель изосейст строилась для групп районов, объединенных по типу тектонических движений. Демографические параметры (людность городов и динамика численности населения) выбирались по локальным и мировым данным на 1970 г.

В результате были получены оценки числа городов N_t и количества населения этих городов D_t , которые испытают указанные сотрясения за период 1971–2000 гг. (табл. 1). Выделены группы близких городов, коррелированных по сотрясениям. По результатам расчета города разделены на три класса опасности:

ТАБЛИЦА 1. Сейсмический риск крупнейших городов, 1971–1995 гг.

Класс опасности	Число городов	N_t		Число фактических сотрясений за 1971–1995 гг.	Прогноз D_t на 1971–2000 гг., млн чел [1]
		Прогноз на 1971–2000 гг. $T = 30$ лет [1]	Пересчет прогноза на 1971–1995 гг.		
А. Особо опасные (группа "Токио")	7	4.1 ± 2.8	3.4 ± 2.6	1.5	20 ± 15.5
В. Умеренно опасные	17	2.6 ± 1.7	2.2 ± 1.6	5	17 ± 15 $(19 \pm 16)^*$ $(12 \pm 9.3)^{**}$
С. Слабо опасные	52	1.3 ± 1.2	1.1 ± 1.1	0	2.9 ± 3.3
А + В + С	76	8.0 ± 3.5	6.7 ± 3.2	6.5	40 ± 21.6

* Альтернативная оценка без исключения афтершоков. ** По прогнозным значениям k_{UN} .

А – особо опасные: группа "Токио" (Токио, Иокогама, Кавасаки, Осака, Кобе, Киото, Нагоя), всего 7 городов;

В – умеренно опасные: группа "Калифорния" (Лос-Анджелес, Сан-Диего, Сан-Бернардино, Сан-Франциско, Сакраменто, Сан-Хосе), Манила, Тайбей, Лима, Мехико и Гвадалахара, Сантьяго, группа "Джакарта" (Джакарта, Бандунг, Палембанг), Стамбул, Гватемала, всего 17 городов;

С – слабо опасные, остальные 52 города.

ФАКТИЧЕСКИЕ СОТЯСЕНИЯ ГОРОДОВ

Данные об ущербе от землетрясений получены из мировых каталогов [3–8] (см. Приложение) и из отдельных публикаций [9–21]. Каталог фактических сотрясений содержит 16 землетрясений, вызвавших ущерб в рассмотренных городах (табл. 2, там же даны библиографические ссылки). Исходя из определения катастрофических событий, для которых получены прогнозные оценки риска, при анализе эмпирических данных нужно исключить влияние локальных грунтовых условий, ущерб от афтершоков, локальные сотрясения и глубокие землетрясения. Поэтому землетрясения, вызвавшие ущерб в рассматриваемых городах, разбиты на пять классов по характеру последствий для населения и экономики:

катастрофические (!!) – уверенно классифицирующиеся как катастрофы (3 события);

надежные (!) – вызвавшие сотрясения VIII баллов и выше на большой площади и/или повлекшие большое число жертв и/или принесшие серьезный ущерб (3 события);

вероятные (?) – недавние события (1995 г.), вызвавшие сильные сотрясения, о которых в настоящий момент нет подробных данных;

локальные (х) – вызвавшие незначительный или локальный ущерб либо ущерб, связанный с локальными грунтовыми условиями или низким качеством застройки (4 события);

слабые (–) – вызвавшие сотрясения меньше VIII ММ или не подтвержденные в литературе, или без указаний на серьезный ущерб в городе (агломерации), или без указаний балльности (6 событий).

Катастрофические землетрясения произошли в Гватемале (1976 г., $I = IX$), Мехико (1985 г., $I = IX$) и Кобе (1995 г., $I = VI$ JMA); последнее вызвало также сотрясения силой V JMA в Киото. Так как согласно принятой модели изосейст $V \text{ JMA} = VII\text{--}VIII \text{ ММ}$, следуя [1], мы относим сотрясения в Киото к вероятным.

К *надежным* мы отнесли землетрясения "Сан-Фернандо" (1971 г.), "Лома Приета" (1989 г.) и "Нортридж" (1994 г.) по следующим причинам. При землетрясении "Сан-Фернандо" центральная часть Лос-Анджелеса испытала только VII-балльные сотрясения, но площадь VIII-балльных сотрясений составила ≈ 800 кв.км в пределах агломерации. Эпицентр землетрясения "Лома Приета" расположен в малонаселенной местности, а в центре Сан-Франциско максимальный ущерб ($I = IX \text{ ММ}$) обусловлен локальными грунтовыми условиями, однако VIII-балльные сотрясения наблюдались и в юго-восточной части агломерации, где было максимальное число раненых. От землетрясения "Нортридж" (1994 г.) пострадало два города Калифорнии – Лос-Анджелес ($I = IX\text{--}X$) и Сан-Бернардино; согласно карте изосейст последний попадает в V-балльную зону.

ТАБЛИЦА 2. Разрушительные сотрясения крупнейших городов мира, 1971–1995 гг.

Город (класс опасности)	Дата	M_s , I MM	Последствия землетрясения и дополнительные данные	Решение (см. текст)
Богота (C)	1995 19.I	6.5 –	5 жертв, несколько дюжин ранено; более 20 крупных зданий разрушено в Боготе. "Felt STRONGLY at Bogota" [8, 7]	–
Гватемала (B)	1976 04.II	7.5 IX	Катастрофа. Самое разрушительное землетрясение в Центральной Америке за XX в. В городе разрушено 25% домов, 100000 бездомных (около 8% населения). В стране 23000 жертв [6], 76000 раненых, бездомных 20% населения [3, 13]. Ущерб на площади 9065 кв.км [3]; полное разрушение традиционных домов на площади 1700 кв.км. Ущерб \$1100 млн [13–15], \$4500–6000 млн [3]	!!
Каир (-)	1992 12.X	5.9 VIII	552 погибших, 9929 раненых, разрушено 8300 домов, ущерб \$300 млн [5]. I = VIII Меркалли; большие разрушения обусловлены плохим качеством застройки и локальными грунтовыми условиями [12]	x
Кали (C)	1995 08.II	6.4 –	40 жертв, 400 раненых; пострадало более 2000 зданий в области Кали-Перейра. Ущерб в городах Армения, Каларка, Кали и многих других в Западной Колумбии	–
Кобе, Киото, Осака (A)	1995 16.I	6.8 VI JMA	Катастрофа. Разрушен Кобе (VI JMA), пострадали Киото (V JMA) и Осака (IV JMA); 5219 жертв, 27000 раненых; 31000 эвакуированы, 109464 зданий разрушено, прямой ущерб \$100 млрд [7, 10]	!!; ?
Лима (B)	1974 03.X	6.6 V–VIII	80 жертв. Город на рыхлых грунтах с высоким уровнем грунтовых вод [16]	x
Лос-Анджелес (B)	1971 09.II	6.5 X	"Сан-Фернандо". Большой ущерб в городе и окрестностях; 66 жертв, около 2000 раненых, ущерб \$505 млн (\$535 млн [13]). I_{max} в Сан-Фернандо, $Q(VIII) \approx 800$ кв.км [9]	!

Лос-Анджелес (В)	1994 17.I	6.8 X, IX [9]	"Нортридж." 57 (60) жертв, более 9000 раненых, разрушено до 40000 домов; 20000 бездомных в Лос-Анджелесе, Вентуре, Оранде и Сан-Бернардино (в последнем V MM по [21]), ущерб \$13-20 млрд (предварительная оценка) [9].	!
Манила (В)	1977 18.III	5.7 -	В городе разрушено несколько домов, $I = VI$ RF [3]	-
Манила (В)	1990 16.VII	7.8 -	В Маниле $I = VII$ RF [7], расстояние до эпицентра > 50 км [17]. На о-ве Лусон 1621 погибших [6]	-
Мехико (В)	1979 14.III	7.6 -	5 погибших, много раненых, разрушения в городе [3,4]. Частичное разрушение зданий обусловлено локальными грунтовыми условиями, $I = VII$ MM [18]	x
Мехико (В)	1985 19.IX	8.1 IX	Катастрофа. Максимальная балльность в центре Мехико. 9500 (10000 [13]) жертв, 30000 раненых; более 100000 бездомных в городе и в центральной Мексике; ущерб \$3-4 млрд. на площади 825 тыс кв.км, цунами до 3 м [3, 6, 13, 18]	::
Сан-Диего (С)	1986 13.VII	5.8 -	В порту разрушено 50 зданий, 25 раненых, ущерб \$720 тыс [3]	x
Сан-Франциско (В)	1989 17.X	7.1 VII-IX	"Лома-Приета". 62 жертвы, 3757 раненых, более 12000 бездомных, ущерб \$6 млрд [11] (\$6.5-10 млрд [10]). Разрушено 1300 и повреждено 20000 зданий (по [10] - соответственно 1100 и 111800). $Q(VIII) = 3000$ кв.км [10]. В Окленде и в центре Сан-Франциско (район Марина) максимальный ущерб ($I = IX$) обусловлен локальными грунтовыми условиями [10; 11, pp.2044, 2145]. Сотрясения силой VIII баллов наблюдались в юго-восточной части агломерации и по берегам залива [11]	!
Тайбей (В)	1986 14.XI	7.8 V JMA	15 жертв, 44 раненых, разрушены подводные кабели телекоммуникаций, разрушено до 60 домов, $I = V$ JMA в провинции Тайбей-Хуа-Льен [3]	-
Токио (А)	1985 04.X	5.9 V JMA	Эпицентр в 25 км к северо-востоку от центра города, 18 раненых в округе Канто, $I = V$ JMA в Токио, $m_b = 6.2$, $h = 78$ км, $M_p = 6.1$ [3]. NEIC об ущербе не сообщает, $M_s = 5.9$, $M_p = 6.2$ [4]. По [19] за 1980-1990 гг. в Такае не было сильных событий	-

Примечание. $Q(VIII)$ - площадь сотрясений балльности VIII. Для землетрясений 1995 г. данные приведены по состоянию на 03.04.95.

Таким образом, произошло 6 землетрясений, которые вызвали сильные сотрясения в шести городах и, вероятно, еще в одном. Учитывая вероятные сотрясения с весом $1/2$, получим 6.5 эффектов, что хорошо согласуется с прогнозом (см. табл. 1). Все события произошли в наиболее опасных городах (классы А и В), их количество соответствует теоретическим оценками так же, как и отсутствие событий в слабо опасных городах (класс С).

При землетрясении в Кобе пострадало 2 города. Такой эффект вполне согласуется с полученными в [1] оценками риска близких городов: условная вероятность того, что при сильном сотрясении одного из городов группы такие сотрясения испытает больше одного города, для группы "Токио" составляет 45%.

Глубина очагов этих землетрясений нормальная, $M \geq 6.5$. Ущерб от ранних афтершоков в сообщениях и публикациях не отделяется от эффекта главного толчка. Ни в одном случае не отмечено серьезного ущерба от более поздних афтершоков, что говорит в пользу принятой в [1] за основную оценки риска при исключенных афтершоках. Более того, судя по описаниям ущерба в публикациях, построение в ближайшее время модели ущерба от афтершоков остается проблематичным.

Исключение из анализа городов в зонах слабой сейсмичности оказалось оправданным. Из 36 таких городов сильные разрушения наблюдались только в Каире, где они были обусловлены низким качеством строительства на слабых грунтах.

АНАЛИЗ РИСКА НАСЕЛЕНИЯ ГОРОДОВ

Доля пострадавших или численность населения в зоне бедствия не оценивается ни в мировых сводках, ни в специальных публикациях (приводится только доля жителей, ставших бездомными, и доля пострадавших жилищ). Прямая проверка оценок эффекта D_t требует совместного анализа данных полевых обследований последствий землетрясений и локальных карт плотности населения крупнейших городов, которые практически недоступны. Поэтому мы проведем косвенную проверку оценок эффекта D_t путем анализа адекватности расчетных параметров реальной демографической ситуации через 25 лет. Население города в [1] определялось двумя параметрами: d_0 – людность города (агломерации) на 1970 г. и k – годовой темп роста населения. Величина k оценивалась ретроспективно (k_r) за период 1950–1970 гг.; альтернативой служили оценки для городского населения крупных демографических провинций по прогнозу UNESCO (k_{UN}) на период до 2000 г. Для групп близких городов использовался общий показатель k .

Демографические данные

Источниками данных о населении служат мировые сводки [22, 23], справочники [24–27] и специальные работы [28, 29]. О низком качестве данных можно судить на примере оценок людности Боготы на 1985 г.: 4.2 [22], 5.8 [25], 4.6 [27] (млн). При попытке оценить достоверность расчетных параметров мы сталкиваемся с принципиальным отсутствием сопоставимых данных:

- переписи населения проводятся в разные годы, а иногда и не проводятся;
- официальные сведения о населении относятся к разным территориям: между переписями ближайшие предместья официально включаются в состав городов (так, площадь Карачи за 37 лет увеличилась в 60 раз [28]). Для городов США, входящих в агломерацию, в последние годы за людность принимается население непосредственно центра (city) (Сан-Франциско, Сан-Бернардино, Сакраменто) [22];

– состав агломераций изменяется во времени: разрастающиеся "ядра" захватывают близлежащие поселения (так, к агломерации Сан-Франциско–Окленд добавился г. Сан-Хосе [22]);

– делимитация агломераций всегда спорна, что обусловлено перманентным несовпадением их административных и фактических границ [27]. Это приводит к серьезным различиям в оценках людности по разным источникам.

Таким образом, оценить достоверность расчетных демографических параметров можно только качественно. В проверке не учтены города Сан-Хуан, Сан-Бернардино и Загреб из-за отсутствия данных.

Для анализа людности приведем все данные к 1990 г. с использованием фактического показателя k после 1970 г. (переписи обычно приурочены к концу десятилетия). Для отдельных городов темпы прироста населения не только изменились в целом, но и менялись в разные интервалы рассматриваемого периода времени. Использование в [1] общих показателей k для групп городов вполне оправдано, так как отражает общие тенденции процессов урбанизации (в группах близких городов согласие с реальной демографической ситуацией значительно лучше, чем для отдельных городов) и тем самым позволяет стабилизировать оценки риска.

Сводные данные по крупным провинциям (табл. 3) показывают, что в большинстве регионов мира темпы роста крупнейших городов (с большими вариациями по провинциям) существенно сократились. В целом по миру оба использованных значения параметра k (k_r и k_{UN}) дают завышенную численность населения на 1990 г. относительно результатов переписей (на 25 и 15% соответственно). Это можно объяснить как изменением демографической ситуации в мире в целом, так и процессами агломерирования. Последнее означает, что городское население растет за счет расширения урбанизированных территорий. Действительно, доля агломераций среди рассмотренных городов за 20 лет (1970–1990 гг.) возросла с 35 до 85%. Принципиальное изменение общих тенденций очевидно из завышенности прогнозных оценок UNESCO: эти оценки относились ко всем городам и для крупнейших должны были быть занижены, так как прежде наиболее быстрым ростом отличались именно самые крупные города [28].

Ретроспективные значения k_r , принятые в [1] как основные, соответствуют заселенности агломераций: для них суммарная ошибка прогноза людности составляет 0.5%. Следовательно, основные оценки риска относятся к агломерациям, что вполне соответствует постановке задачи в [1]. Альтернативные оценки скорее соответствуют риску населения традиционных центров и несколько завышены, особенно для стран Южной Азии. В целом ошибка прогноза людности сопоставима с точностью исходных демографических данных и может считаться вполне удовлетворительной в рамках глобальной задачи.

Структура оценок риска населения

Для изолированного города людности d_0 и с темпами роста населения k локальной характеристикой риска служит эффект D – среднее число жителей, которые могут испытать сильные сотрясения за год, усредненное по периоду T лет:

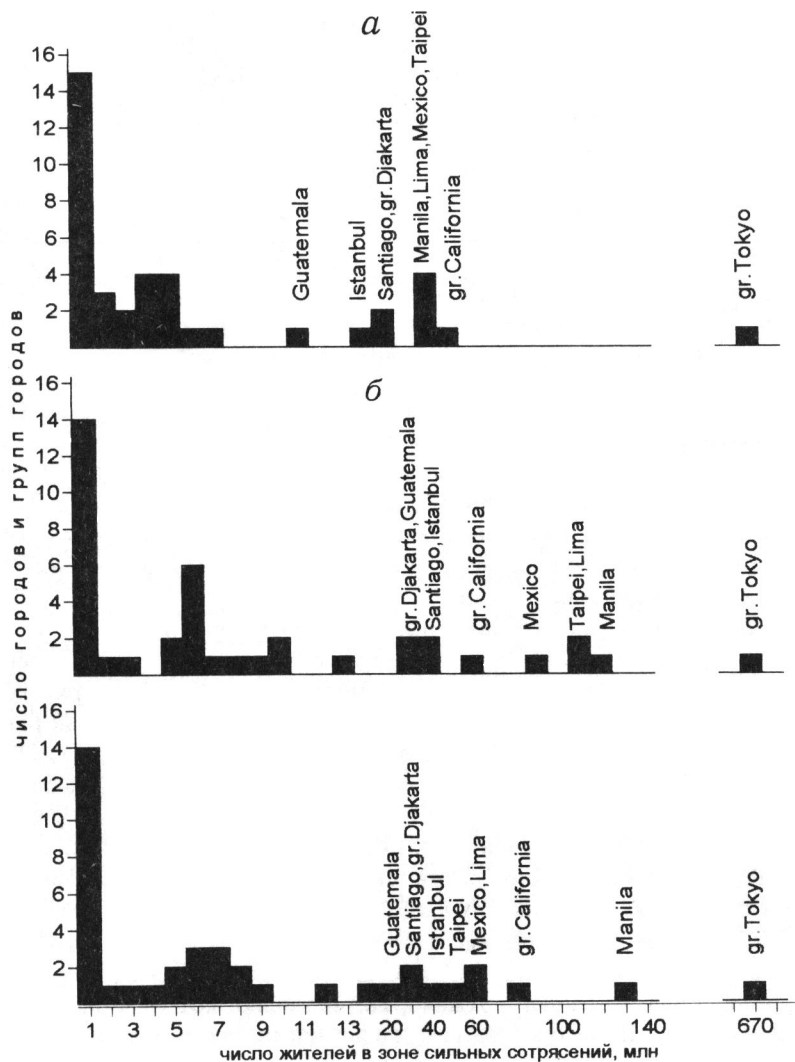
$$D = \lambda d_0 \exp(kT - 1)/(kT),$$

где λ – среднегодовое число сильных сотрясений.

ТАБЛИЦА 3. Достоверность оценок людности крупных городов в демографических провинциях

Демографическая провинция	Число городов $n(N)$	Расчетные параметры на 1970 г.				Людность на 1990 г., млн чел.				Фактическая темпы прироста		Ошибка прогноза людности, %			
		d_0	k_r	k_{UN}	d_r	d_{UN}	Прогноз		d_a	k_i	k_a	δd_r	δd_{UN}	δd_t	δd_{UN}
							d_t	d_i							
Япония	10	27.2	0.5	3.2	29.8	51.8	28	-	0.14	-	-	+6	-	-	-
США и Канада	8(9)	16.8	1.3	1.4	21.9	22.3	32	-	3.2	-	-	-28	-31	-	-
Юго-Восточная Азия	8	15.0	5.1	3.2	41.5	28.4	26.5	36.0	2.85	4.4	4.4	+56	+7	+15	-21
Латинская Америка	11(12)	25.9	5.1	3.6	74.1	53.4	48.7	65.9	3.2	4.7	4.7	+53	+10	+9	-19
Южная Азия	8	22.1	3.9	4.3	48.2	52.1	42.0	56.7	3.2	4.7	4.7	+15	+24	-16	-8
Северная Африка	3	2.6	5.0	4.8	7.0	6.8	5.9	10.1	4.1	6.8	6.8	+20	+15	-30	-33
Ближний Восток	7	10.9	5.5	4.3	33.0	25.7	25.5	30.0	4.2	5.0	5.0	+30	+1	+10	-14
Европа	14(15)	21.3	2.5	1.5	35.2	28.7	23.6	34.0	0.51	2.3	2.3	+49	+22	+3	-16
Страны СНГ	4	4.4	2.5	1.9	7.3	6.4	6.6	-	2.0	-	-	+11	-3	-	-
Все города	73(76)	146.2	3.6	3.2	298	276	239	300	2.5	3.6	3.6	+25	+15	-0.5	-8

Примечание. n – число городов, участвующих в проверке (общее число N дано при $n < N$), d_0 – суммарная людность n городов на 1970 г., k_i , % – темпы прироста населения, d_i – людность городов на 1990 г. Индекс i указывает тип исходных данных: r – ретроспективные, UN – прогноз UNESCO, f – по переписям, a – по оценкам с учетом агломераций.



Локальные характеристики риска населения городов и групп городов

а – в начале расчетного периода (1970 г.); *б, в* – усредненные по расчетному периоду 30 лет при ретроспективных оценках *k*, при фактическом значении *k* за 1970–1990 гг. соответственно

Для группы городов λ определяет число сильных сотрясений, захватывающих хотя бы один из городов этой группы. Эффект *D* показывает относительный вклад города (группы городов) в суммарный эффект. Гистограмма локальных характеристик *D* (см. рисунок) представляет структуру сейсмического риска городов; различия обусловлены только демографическим параметром *k*.

В табл. 4 приведена фактическая динамика населения городов, сгруппированных по степени опасности. Рассмотрим структуру риска для населения.

Основной вклад в сейсмический риск вносят города классов А и В.

ТАБЛИЦА 4. Фактическая динамика населения групп городов

Класс опасности	Число городов	Людность, млн				
		1970 г.	Прогноз на 1990 г.		Фактическая на 1990 г.	
		d_0	d_r	d_{UN}	d_f	d_a
А. Особо опасные	7	24.1	24.7	-	24.1	24.1
В. Умеренно опасные	16	45.8	113.3	83.3	89.3	110.5
С. Слабо опасные	50	76.3	162.2	146.3	125.2	164.9
А + В + С	73	219.2	300.2	254.3	238.6	299.5

Обозначения, как в табл. 3

В городах группы "Токио" (класс А) расчетное значение k_r формально оказалось вполне соответствующим реальной стабилизации населения [22]. Поскольку оценка N_t соответствует наблюдениям, то и оценку D_t можно считать удовлетворительной. Однако можно предположить, что совокупный риск городского населения здесь увеличился в результате формирования мегалополиса Токайдо от Токио до Кобе, в котором проживает более 60 млн человек [26]. В таких условиях расселения риск городского населения можно только качественно характеризовать оценкой D_t для крупнейших городов.

В классе В оценки риска отвечают населению агломераций.

В городах США и Канады население растет быстрее, чем ожидалось. В Калифорнии формируется полицентрический мегалополис [27], что при оценивании риска требует в дальнейшем учета пространственных характеристик расселения.

Среди особо опасных в [1] были выделены бурно растущие города ($k_r=6-7\%$) Манила, Тайбей, Лима и Мехико. Очень высокие темпы прироста населения сохранились в Большой Маниле ($k_a=4.5-6.9\%$ [22, 25]). Большое Мехико уже является крупнейшей в мире агломерацией, и хотя темпы прироста снизились в полтора раза (до 3-4%), город продолжает расти, выплескиваясь за границы Федерального округа (отсюда и разные оценки людности). Сократился рост населения в Лиме ($k_a=3.3\%$) и особенно в Тайбее ($k_a=1.9\%$). С учетом повторяемости сотрясений эти города все-таки остаются лидерами по опасности для населения (см. рисунок). К ним приблизились Стамбул и Джакарта, население которых за 15 лет увеличилось в 2-2.5 раза. В следующем по степени опасности городе Карачи риск населения втрое ниже, а в остальных городах риск ниже на порядок. Следующая сводка дает представление об относительной опасности перечисленных городов (на 1990 г.):

Город, агломерация	λ 100 лет	D_t^* тыс чел/год	Доля в промышленном производстве страны
группа "Токио"	8.31	654	>1/3 (Большое Токио)
Большая Манила	0.91	123	2/3
Большое Мехико	0.35	59.3	1/2
Лима	1.00	58.9	4/5
Тайбей	1.79	43.7	главный промышленный центр
Стамбул	5.07	38.8	
Большая Джакарта	2.51	24.4	незначительная
Карачи	1.03	7.1	1/2

D_t^* – годовое среднее число жителей в зоне сильных сотрясений.

Из последней графы видно, что сильные сотрясения в этих районах могут оказаться национальной катастрофой. Концентрация национального производства в этих центрах (кроме Тайбея и Джакарты) так велика, что сильное событие может парализовать экономику страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хорошее согласие (см. табл. 1) прогноза с данными для всей совокупности городов (прогноз 6.7 ± 3.2 ; фактические данные 6.5) следует рассматривать как подтверждение пригодности Пуассоновской модели последовательности землетрясений при анализе риска больших совокупностей однородных объектов.

Наблюдения VIII-балльных сотрясений городов хорошо согласованы с прогнозными оценками в группах А и С. Отклонение от прогноза в группе городов В составляет около двух дисперсий, т.е. укладывается в доверительные уровни случайных флуктуаций.

Ошибка в расчетной численности населения на 1990 г. сопоставима с погрешностью исходных демографических данных. Поскольку прогноз числа сотрясений городов хорошо согласован с наблюдениями, глобальный прогноз численности населения в зоне бедствия также можно считать достаточно достоверным.

Небольшая ошибка в оценке суммарной людности городов на 1990 г. (0.5%) при существенных ошибках для отдельных поселений еще раз показывает необходимость оценивать риск для большой совокупности объектов. Очевидно также, что при расчетах долговременного риска в локальном районе рационально выбирать более стабильные меры ущерба, чем опасность для урбанизированного населения.

Массовые процессы агломерирования и формирование мегалополисов, соизмеримых по размерам с сейсмогенными зонами, качественно меняют проблему риска городского населения. В первую очередь необходимо учитывать пространственные характеристики заселенности и локализовать сейсмологические модели.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-05-65 817)

ПРИЛОЖЕНИЕ

Данные о последствиях землетрясений в мировых каталогах

Для сопоставления прогнозных оценок с реальностью нужно было получить данные о фактических сотрясениях в крупнейших городах за последние 25 лет и классифицировать их по характеру ущерба. Исходными данными служили каталоги ISC [3] и NEIC [4], ежемесячные бюллетени EDR [5], обновляемые сводки сильных землетрясений [6, 7] и оперативные данные QED [8].

Данные о последствиях землетрясений не входят в стандартизованное содержание бюллетеней. В каталогах ISC и EDR эти данные включены в комментарии в неформализованном виде, и их детальность существенно меняется от события к событию. Кроме того, от года к году меняется форма представления балльности и магнитуды. Поэтому массовая обработка интересующих нас данных потребовала контекстного поиска и синтаксического анализа комментариев с последующей ручной обработкой. Ручная обработка оказалась необходимой именно из-за свободного

формата представления сведений об ущербе и нарушениях в описаниях принятых, но не оговоренных правил.

Процедура поиска данных заключалась в выборке событий с $M \geq 5$ и/или $I > VII$ ММ и/или $I > IV$ ЖМА и/или с указаниями на разрушения или жертвы. Из полученной выборки для дальнейшего анализа оставлены события, которые нанесли или могли нанести рассматриваемым городам ущерб от VIII баллов и выше. Отобранные события проверены по публикациям.

Позволим себе привести несколько замечаний, касающихся указанных каталогов, которые могут быть полезны другим пользователям.

1. Каталог ISC [3]. Комментарии в строках формата "3" и "4" содержит разнородную информацию. Мы считаем целесообразным ввести в формат каталога специальные типы записей для параметров центроида и определений механизма, которые в последние годы сообщаются регулярно.

В описании формата нет никаких указаний на порядок заполнения поля комментариев в смысле синтаксиса и орфографии. Более того, принятый порядок изменяется от года к году и часто нарушается при слиянии сведений из разных источников.

С 1971–1972 гг. в комментариях появилось сообщение о магнитуде с указанием количества используемых станций, при этом в основной информационной строке (формат "1") данные о магнитуде повторялись. Начиная с 1973 г. значение магнитуды, приведенное в комментариях как "магнитуда/число станций", в основной информационной строке не представлено.

Для некоторых событий в каталоге содержится по 2–3 версии.

2. Каталог NEIC (vx format) [4]. Минимальная информация об ущербе в виде кода (H – Heard; F – Felt; C – Casualties; D – Damage) присутствует не всегда.

3. Бюллетень EDR [5]. Максимальная интенсивность сотрясений (балл) приводится только в комментариях. В специальном поле, предусмотренном в формате для этого параметра, значение балла может отсутствовать даже для события с большими разрушениями.

Если магнитуда события определена только по отдельным станциям, то поля "contributed magnitudes" данных о магнитуде не содержит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейлис-Борок В.И., Кронрод Т.Л., Молчан Г.М. Сейсмический риск крупнейших городов мира // Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных. М.: Наука, 1984. С.93-117. (Вычисл. сейсмология; Вып.16).
2. Кейлис-Борок В.И., Кронрод Т.Л., Молчан Г.М. Алгоритм для оценки сейсмического риска // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. М.: Наука, 1973. С.21-43. (Вычисл. сейсмология; Вып.6).
3. ISC Bulletin, CD-ROM Associated Phase & Comment Data. 1964–Aug. 1987. Version 1.0.
4. NEIC, CD-ROM Global Hypocenter Data Base. Version 1.0. U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. Denver. Co.
5. Earthquake Data Report, Aug. 1990–May 1993. U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. Denver. Co.

6. Earthquakes with 1,000 or More Deaths from 1900. U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. Denver. Co.
7. Significant Earthquakes of the World, 1990, 1991, 1992; 1993 (last modified 27 June 1994); 1994 (last modified 27 January 1995); 1995 (last modified 03 April 1995). U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. Denver. Co.
8. Quick Earthquake Determination (QED). U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. Denver. Co. 1995.
9. San Fernando Earthquake, February 9, 1971. United States Earthquakes. 1971. U.S. Geological Survey.
10. Ландер А.В., Штейнберг В.В. Землетрясение 18 октября 1989 г. в Северной Калифорнии // Вопросы инженерной сейсмологии; Вып. 32. М.: Наука, 1991. С.76-87.
11. The 1989 Loma Prieta, California, Earthquake and its effects // Bull. Seism. Soc. Amer. Spec. issue. Vol.81, N5. 2166 p.
12. Castellano M., Milano G. Italy-Egypt Scientific Cooperation. The Egyptian Earthquake, 12 October 1992 // Disasters. N12 (March-April 1993). P.1018-0850.
13. Berz G. List of Major Natural Disasters, 1960-1987 // Volcaniks & Earthquakes. Vol.20, N6. 1988. P.97-99.
14. Cano J. Guatemala earthquake of February 4, 1976: Description and analysis of damage caused on buildings // Recent Destruct. Earthquakes. 1977. N1. P.1-76.
15. World map of natural hazard Munich: Munich Reinsurance Co. 1978. 49 p.
16. Espinosa A., Husid R., Algermissen S.T., J de Las Casas. The Lima earthquake of October 3, 1974: Intensity distribution // Bull. Seism. Soc. Amer. 1977. Vol.67, N5. P.1429-1439.
17. Shibutani T., Ohkura T., Iio Y. et al. Search for the Buired Subfault(s) of the 10 July 1990 Luzon EQ, the Philippines, Using aftershock observation // J. Natural Disaster sci. 1991. Vol.13, N1. P.29-38.
18. Terremoto de Mexico '85 Muenchen: Muenchener Ruek. 1986.
19. Rikitake T. Threat of an earthquake right under the capital in Japan // Earthquakes & Volcanoes. 1990. Vol.22, N5. P.209-210.
20. EOS. Vol.76, N6. February 7. 1995.
21. Dewey J., Reagor B., Dengler L., Moley K. Intensity distribution and isoseismal maps for the Northridge, California, earthquake of January 17, 1994. U.S. Department of the interior, U.S. Geological Survey, Open-File Report 95-92, 1995.
22. Demographic Yearbook, UNESCO. 1991.
23. Estimates and projections of urban, rural and city population 1950-2025. The 1982 assessment N.-Y.: Dep. of inter. econ. a socialaffaics. UN. 1985.
24. Народонаселение стран мира. Справочник / Под ред. Б.Ц.Урланиса. М.: Статистика, 1978. 527 с.
25. Страны мира: Справочник. М.: Политиздат, 1986. 511 с.; 1988. 477 с.
26. Географический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1989. 592 с.
27. Демографический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 607 с.
28. Озерова Г.Н., Покшишевский В.В. География мирового процесса урбанизации. М.: Просвещение, 1981. 190 с.
29. Censo nacional de poblacion y vivienda 1991. Buenos Aires: INDEC, 1991. 219 p.