

УДК 550.34

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН ОЖИДАЕМОГО УЩЕРБА ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КИРГИЗИИ

© 2010 г. М.В. Родкин¹, М.Х. Сваров²

¹ *Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
г. Москва, Россия*

² *Академия гражданской защиты МЧС России, г. Москва, Россия*

Прогноз возможного ущерба от землетрясения – задача не менее актуальная, чем прогноз самого землетрясения, поскольку он важен для планирования мероприятий по уменьшению потерь. Задача оценки величины ожидаемого ущерба относится к задачам оценки суммарного эффекта от случайной совокупности событий, в том числе редких и экстремально сильных. Ранее такая задача была решена на мировом и наднациональном уровне; ее решение на национальном уровне затруднялось недостатком данных.

Авторами предлагается методика оценки величины ожидаемого ущерба от редких сильных природных катастроф на национальном уровне с привлечением данных по другим регионам, аналогичным по природным и социально-экономическим условиям. Методика описана и реализована для территории Киргизии на примере оценки ущерба, наносимого землетрясениями.

Ключевые слова: природные катастрофы, сейсмический режим, режим роста величин ущерба от катастроф.

Введение

По разрушительным последствиям и числу человеческих жертв одно из первых мест среди природных катастроф занимают землетрясения. Страны, расположенные в сейсмоактивных районах, стремятся снизить ущерб от землетрясений путем развития средств реагирования в чрезвычайной ситуации и проведения комплекса превентивных мероприятий, направленных на повышение безопасности населения и производственной инфраструктуры. Планирование таких мероприятий требует количественной оценки ожидаемого ущерба (числа убитых и раненых, величины экономических потерь). Подобные оценки требуют большой базы статистических данных. Ранее они выполнялись для мира в целом, а также отдельно для двух групп стран – развитых и развивающихся [Писаренко, Родкин, 2003, 2007]. Однако для правительств и региональных объединений наибольший интерес представляют не общемировые оценки величин ущерба, а территориальные, выполненные на уровне отдельных стран или их групп. Авторами предлагается вариант решения такой задачи для случая, когда невозможно использовать метод расчета сценариев сейсмических катастроф из-за отсутствия детальных данных по инфраструктуре и сейсмостойкости зданий.

В сейсмическом отношении практически вся территория Киргизии находится в зоне высокой сейсмической опасности, где именно землетрясения – тот вид природных явлений, который приводит к чрезвычайным ситуациям. Площадь ожидаемых сейсмических воздействий в 9 и более баллов по шкале *MSK-64* занимает 20% всей территории Киргизии (40 тыс. км²), в 8 баллов – 79% (158 000 км²), 7 – 1% [Прогноз ..., 2006]. Ежегодно сейсмостанции страны регистрируют около 3500 толчков, десятки из которых являются ощутимыми, а некоторые приводят к ущербу, выражающемуся в повреждении жилых домов и инженерных сооружений [Отчет..., 2006]. Наибольший ущерб при этом наносится редкими сильнейшими событиями. Так, 11-балльное Кеминское

землетрясение, произошедшее в 1911 г. и ставшее самым разрушительным в прошлом столетии, унесло жизни более 15 тыс. человек. (Эта цифра является ориентировочной, полученной на основе оценки числа жертв от оползней и других сопутствующих эффектов на киргизских кочевьях. Здесь и далее используются максимальные оценки как предположительно более точные.) Во время Суусамырского землетрясения 1992 г. с эпицентром в малонаселенной долине р. Суусамыр погибло 74 человека, 60 тыс. человек остались без крова, полностью были разрушены или пришли в негодность 16056 жилых домов и объектов инфраструктуры. Общий ущерб составил более 130 млн. долларов США. В результате недавнего (05.10.2008 г.) 8-балльного землетрясения с эпицентром в пос. Нура Алайского района 74 человека погибли, 140 были ранены, полностью разрушенными оказались 152 жилых дома.

Очевидно, что масштабы происходящих сейсмических катастроф имеют весьма широкий диапазон. При этом редкие сильнейшие события наносят ущерб, сравнимый с суммарным ущербом от всех других (более слабых) землетрясений. Обладающее такой особенностью распределение называют “распределением с тяжелым хвостом”. Оно описывается степенными законами распределения [Woo, 1999; Sornette, 2000; Писаренко, Родкин, 2007]. При степенном законе распределения (законе Парето) функция распределения $F(x)$ представляется соотношением:

$$F(x) = 1 - \left(\frac{c}{x}\right)^\beta; \quad x \geq c, \quad (1)$$

где параметры c и β больше нуля.

По сравнению с привычным нормальным распределением для “распределений с тяжелым хвостом” аномально высока вероятность реализации экстремально больших событий. С этим связана особенность степенных распределений с показателем степени распределения $\beta \leq 1$, состоящая в бесконечности среднего значения соответствующих распределений (см. подробности в [Родкин, Писаренко, 2000; Писаренко, Родкин, 2007]). Эта особенность порождает невозможность применения обычно используемых статистических характеристик – среднего значения и дисперсии (значение дисперсии при степенных распределениях бесконечно при $\beta \leq 2$). При работе с “распределениями с тяжелым хвостом” следует применять ранговые статистики.

Важным (используемым ниже) следствием бесконечности среднего значения для степенных распределений с показателем степени $\beta \leq 1$ является то, что при таких распределениях величина суммарного эффекта $U(t)$ нарастает со временем нелинейно, как t^α , где $\alpha > 1$. Эффект нелинейного роста кумулятивных значений объясняется тем, что с увеличением времени регистрации возрастает вероятность реализации экстремально сильного события, вносящего значительный вклад в суммарный эффект. Отметим, что параметр степенного закона β и параметр α связаны соотношением $\alpha = 1/\beta$ (см. [Rodkin, Pisarenko, 2006; Писаренко, Родкин, 2007]).

В работах [Писаренко, Родкин, 2003, 2007] дается долгосрочный прогноз величин ущерба от землетрясений в мировом и региональном масштабе. Прогноз получен аналитически и путем численного бутстреп-моделирования роста величин ущерба со временем. При оценке величин материального ущерба учитывались колебания курса доллара (значения ущерба были приведены к уровню цен 1990 г.). Такая коррекция, не меняя качественно результатов анализа, позволила точнее оценить степень однородности каталога.

Полученные в работе [Писаренко, Родкин, 2003, 2007] модели роста вероятного числа жертв и материального ущерба от сейсмических катастроф со временем приведены на рис. 1. Полученный прогноз представляется обоснованным на срок около 50 лет (пока изменение социально-экономических условий не приведет к резкому изменению

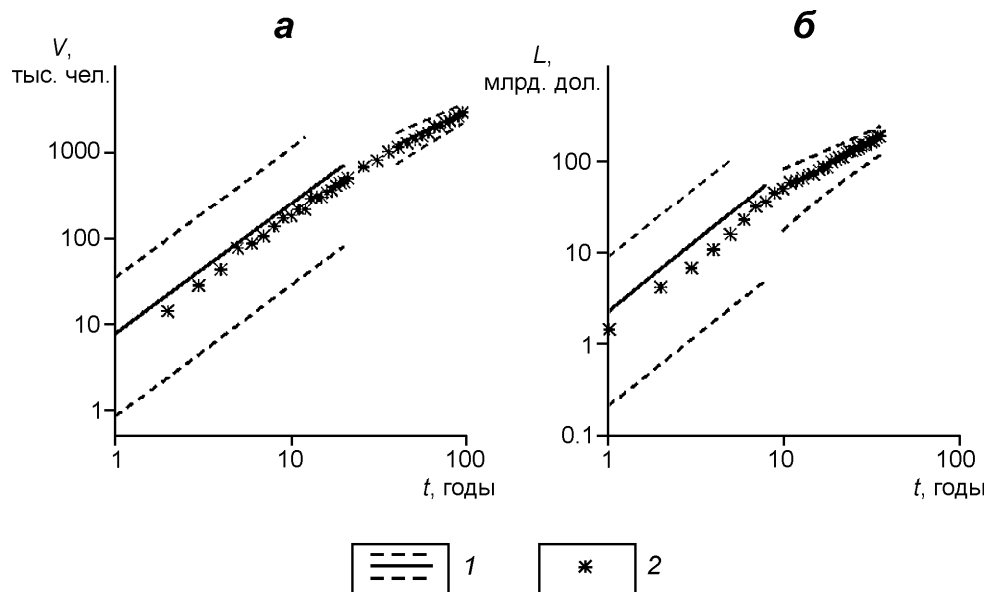


Рис. 1. Прогноз мировых значений ущерба от землетрясений для накопленного числа жертв (а) и прямых экономических потерь (б)

1 – доверительный интервал (аналитический расчет), 2 – результаты численного моделирования медиан значений ущерба бутстреп-методом. На горизонтальных осях – время, на которое распространяется прогноз (t , годы). Масштаб по обеим осям логарифмический

чувствительности социо- и техносферы к сейсмическим воздействиям). Характерные особенности режима роста величин ущерба от землетрясений – большой (на порядки величины) разброс значений возможного ущерба и нелинейный режим роста величин ожидаемого ущерба (его квантилей) на протяжении первых 10–20 лет.

Как отмечалось выше, большой разброс и нелинейный режим роста величин ущерба со временем обусловлены специфическим характером распределения величин ущерба – наличием у него “тяжелого хвоста”. С увеличением времени прогноза (более 10–20 лет для мировых данных) начинает сказываться ограниченность максимально возможных величин ущерба; характер распределения при этом меняется, и величина накопленного ущерба начинает расти со временем линейным образом (см. рис. 1). Более детально эти изменения режима обсуждаются в [Писаренко, Родкин, 2003, 2007].

Для разработки национальных программ уменьшения ущерба от природных катастроф требуются оценки ожидаемого ущерба не в масштабах континентов, а для территорий отдельных стран. Получение таких оценок затруднено явным недостатком данных о величинах ущерба для них. В настоящей статье на примере Киргизии представлена методика расчета прогноза кумулятивных величин ущерба от сейсмических катастроф (количество погибших и раненных, прямые экономические потери) для территории отдельной страны, основанная на использовании данных об ущербе от землетрясений для других территорий, которые имеют близкие природные и социально-экономические условия. Отметим, что при наличии данных по микросейсмическому районированию, инфраструктуре и сейсмостойкости сооружений можно было бы получить более точный прогноз величины ущерба методом расчета сценариев катастроф. Однако для значительной части развивающихся стран (в частности, для Киргизии) подобная информация отсутствует. В такой ситуации представляется целесообразным использование описываемой ниже методики расчета.

Методика оценки величин ущерба

Предлагаемый алгоритм оценки величин ущерба от сильных сейсмических событий включает три основных этапа работ. Первый этап – анализ сейсмического режима территории Киргизии на основе каталога землетрясений с целью уточнения параметров графика их повторяемости; второй – анализ имеющихся данных по величинам ущерба для территории Киргизии и подбор мировых аналогов значений ущерба в связи с недостаточностью данных для оценки ожидаемых величин ущерба; третий – численное моделирование величин ущерба в зависимости от времени и выдача долгосрочного (до 50 лет) прогноза кумулятивных значений ущерба для территории Киргизии. Кратко прокомментируем эти три этапа, после чего перейдем к описанию исходных данных, процедуры их обработки и полученных результатов.

Первый этап предусматривает получение для территории Киргизии (или использование уже имеющихся) робастных оценок периодов повторяемости землетрясений различной магнитуды. При этом для построения графика повторяемости в области событий средней силы целесообразно использовать данные за период с начала 60-х годов прошлого столетия, т.е. с момента создания сети сейсмических наблюдений на территории Киргизии. Для оценки же режима повторяемости редких сильных землетрясений следует использовать данные по сейсмическому режиму, как минимум, с начала прошлого века.

Второй этап направлен на выяснение характера статистической связи между силой землетрясения и ущербом для данной территории. Данные о величинах ущерба, нанесенного разными землетрясениями на территории Киргизии, единичны – шесть свидетельств о числе погибших, три о числе раненых, два о материальном ущербе (таблица), – что не позволяет статистически оценить величину ожидаемого ущерба. Для пополнения базы данных нами были использованы мировые данные по ущербу от землетрясений, произошедших на территориях с близкими сеймотектоническими и социально-экономическими условиями. Такой подход является новым, его описание приводится ниже.

Третий этап прогноза величин ущерба – собственно процедура расчета прогноза на основе двух сформированных ранее массивов данных по сейсмическому режиму и по режиму величин ущерба от землетрясений.

Сильные сейсмические события ($M \geq 5.8$), произошедшие на территории Киргизии в период с 1970 по 2008 г.

№	Год	Месяц	Дата	Географические координаты		Глубина, H , км	Магнитуда, M	Интенсивность, баллы	Число погибших	Материальный ущерб, млн. долл. США	Число раненых
				Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1970	6	5	42.52	78.73	15	6.8	9	2	NaN*	0
2	1971	3	23	41.43	79.36	10	6.1	8	0	0	0
3	1972	1	15	40.33	79.07	22	6.2	8	0	0	0
4	1974	8	11	39.46	73.83	9	7.3	10	0	NaN	0
5	1976	7	28	39.29	72.79	50	6.1	8	0	0	0
6	1977	1	31	40.04	70.85	20	6.1	8	0	NaN	0
7	1977	12	18	39.9	77.41	50	6.2	8	0	0	0
8	1978	3	24	42.84	78.61	33	7.1	10	0	NaN	0
9	1978	10	8	39.4	74.76	50	6.1	8	0	0	0
10	1978	11	1	39.35	72.62	40	6.8	9	0	NaN	0
11	1982	12	31	42.87	77.37	20	5.8	8	0	0	0
12	1983	2	13	39.95	75.14	16	6.2	9	0	0	5

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	1983	12	16	39.38	72.93	10	6.1	9	0	NaN	0
14	1983	4	5	40.03	75.26	33	6	8	0	0	0
15	1984	10	26	39.1	71.4	7	6.2	8	0	NaN	0
16	1985	8	23	39.76	75.18	3	6.4	9	0	0	0
17	1985	9	11	39.29	75.48	25	5.8	8	0	0	0
18	1985	10	3	39.5	75.4	20	7.1	10	0	0	0
19	1985	10	13	40.3	69.8	10	6	8	29	NaN	80
20	1987	1	24	41.515	79.318	29	5.9	8	0	0	0
21	1990	12	1	40.854	73.553	29	5	6	0	0	0
22	1990	11	12	43.08	77.97	15	6.4	9	0	NaN	0
23	1990	4	17	39.436	74.9	33	6.2	8	0	0	0
24	1992	5	15	41.1	72.42	5	6.3	8	0	NaN	0
25	1992	5	22	41.019	72.429	50	6.2	8	12	31	NaN
26	1992	8	19	42.1	73.6	27	7.5	10	74	130	NaN
27	1995	10	8	41	72	34	5.9	8	0	0	0
28	1996	3	19	40.08	76.67	33	6.3	8	0	0	0
29	1997	1	9	41.026	74.284	22	5.8	7	0	2	NaN
30	1997	4	6	39.47	76.95	33	6.2	8	0	0	0
31	1997	4	15	39.69	77.06	33	6	8	0	0	0
32	1997	4	11	39.67	76.97	17	6.2	8	0	0	0
33	2003	12	1	42.905	80.515	10	6	8	0	0	0
34	2003	2	24	39.32	77.18	24	6.3	8	0	0	0
35	2004	11	17	39.189	71.857	20	5.8	8	0	0	0
36	2005	2	14	41.728	79.44	22	6.2	8	0	0	0
37	2006	7	6	39.133	71.824	24	5.8	8	0	0	0
38	2006	12	25	42.156	76.163	11	6	8	0	NaN	0
39	2007	1	8	39.803	70.311	18	6	8	0	0	0
40	2008	10	5	39.533	73.824	27	6.7	9	74	NaN	140

* NaN – наличие ущерба отмечено (или очевидно из общих соображений), но количественная оценка отсутствует.

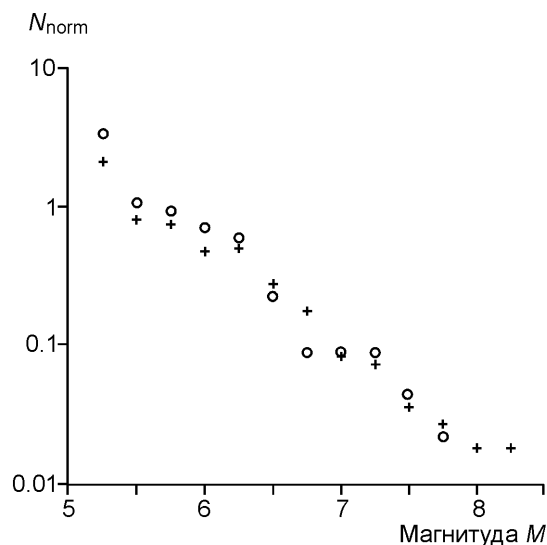
Для расчета прогноза была реализована численная имитационная модель. При этом

- число землетрясений данной магнитуды задавалось пуассоновским распределением со средним значением, отвечающим графику повторяемости землетрясений;
- учитывалась доля сейсмических событий, произошедших в ненаселенной местности и потому не приносящих ущерба;
- модельное значение ущерба определялось случайной выборкой из базы данных для значений ущерба от событий данной магнитуды.

Рассчитывалось значительное (700) число случайных реализаций величин ущерба на срок 1, 2, ... 50 лет, и в качестве прогноза использовались медиана и квантили полученного распределения. Далее более подробно описываются перечисленные этапы расчета и полученные результаты.

Учитывая степень надежности регистрации землетрясений на территории Киргизии и то, что ощутимые величины ущерба связаны только с относительно сильными событиями, мы ограничились рассмотрением землетрясений с $M \geq 5$. На основе регионального каталога землетрясений [Кальметьева и др., 2009] для территории Киргизии были сформированы два подкаталога: один для землетрясений преимущественно умеренной ($M=5.25-7.25$) силы за 1965–2009 гг., другой для более сильных землетрясений за 1900–2009 гг. Полученные для этих подкаталогов графики повторяемости землетрясений (для средних значений числа событий за год) представлены на рис. 2. С целью сглаживания графиков расчеты выполнялись в перекрывающихся интервалах магнитуд ($5 \leq M \leq 5.5$, $5.25 \leq M \leq 5.75$ и т.д.), но, несмотря на это, графики повторяемости землетрясений по данным регионального каталога существенно нерегулярны. Отметим также, что

Рис. 2. Среднегодовое число землетрясений (N_{norm}), произошедших на территории Киргизии за период 1900–2009 гг. (крестики) и 1965–2009 гг. (кружки)



в области малых магнитуд на обоих графиках отсутствует явное выполаживание, т.е. $M=5.2$ можно предположительно принять за уровень надежной регистрации.

Оценка наклонов графика повторяемости (параметра b) для обоих подкаталогов проводилась двумя методами – методом наименьших квадратов и методом максимальной энтропии, первый из которых не требует специальных пояснений. Вторым методом детально рассмотрен в работах [Aki, 1965; Marzocchi, Sandri, 2003], где приведена удобная для расчетов параметра b формула:

$$b = \frac{0.4343}{M_c - M_m + 0.5\Delta M}, \quad (2)$$

где M_c – среднее значение магнитуд в каталоге; M_m – минимальное надежно определяемое значение, ΔM – использованная ширина интервала значений магнитуд.

Полагая $M_m=5.2$, $\Delta M=0.15$ и рассчитывая среднее значение M_c , методом максимального правдоподобия получаем $b=0.69$ для подкаталога за 1900–2009 гг. и $b=0.83$ для подкаталога за 1965–2009 гг.; методом наименьших квадратов для первого каталога $b=0.7$, для второго $b=0.803$. Обобщая полученные значения, находим наклон графика повторяемости $b = -0.75 \pm 0.1$; для закона повторяемости землетрясений Гуттенберга–Рихтера для территории Киргизии получаем соотношение:

$$\lg n = -0.75M + 4.05, \quad (3)$$

где n – среднее число землетрясений с магнитудой $M (\pm 0.25)$ за год.

Отметим, что для данной работы особой точности параметров графика повторяемости и не требуется, так как основной разброс в результаты прогноза вносится данными о величинах ущерба.

В практике оценки сейсмической опасности использование классического закона Гуттенберга–Рихтера (3) общепринято. Этот закон, по-видимому, не вполне точен, можно ожидать, что более точный закон повторяемости будет отличаться от (3), отвечая относительно уменьшению числа редких сильных землетрясений (см. [Мамыров и др., 2001; Родкин, 2005; Соболев, 1993; Pisarenko, Sornette, 2004] и др.). Однако такое отличие вряд ли может быть выявлено по существующим данным о сейсмичности Киргизии, и его вклад в величину ущерба будет второстепенен (в связи с насыщением величин ущерба в области максимально возможных катастроф). С учетом вышесказанного далее при численном моделировании величин ущерба будем задавать сейсмический режим территории Киргизии соотношением (3).

Перейдем к описанию данных о величине ущерба от землетрясений, которую принято характеризовать тремя параметрами: безвозвратными потерями (числом по-

гибших), числом раненых и величиной прямого экономического ущерба. Подобного рода сведения для территории Киргизии (см. таблицу) носят отрывочный характер и в ряде случаев явно неточны. Так, для Суусамырского землетрясения указаны 74 погибших, при этом наличие раненых не отмечается, что может означать их отсутствие. Такого рода информация представляется неправдоподобной, и для дальнейшего анализа нами использовались только случаи явного указания величины ущерба (будь то значения числа убитых, раненых или экономических потерь). Отметим также, что в советское время в сообщениях о произошедших землетрясениях часто занижались их балльность и величина ущерба [Николаев, 2007].

Данных, приведенных в таблице по сильным землетрясениям и величине ущерба от землетрясений для территории Киргизии (символом *NaN* отмечены случаи, когда наличие ущерба очевидно, но не охарактеризовано численно), явно недостаточно для статистической оценки величин ожидаемого ущерба. Поэтому для расширения статистики были привлечены мировые данные по ущербу от землетрясений, произошедших на территориях с близким (активным) сейсмическим режимом и подобными социально-экономическими условиями. Необходимость учета последнего фактора связана с тем, что, как известно [Оценка..., 1997; Родкин, Писаренко, 2000; Писаренко, Родкин, 2003, 2007], величина ущерба от землетрясений сильно зависит (в статистическом смысле) не только от силы сейсмического воздействия, но и от социально-экономической ситуации, имеющей место на данной территории. Приведем несколько недавних примеров. Землетрясение на Гаити (12.01.2010 г.) с $M=7$ привело к гибели более 220 тыс. человек и материальному ущербу, превышающему 8 млрд. долларов США; близкое по силе ($M=6.9$) землетрясение в США (03.09.2009 г.) обошлось без жертв, а разрушительное землетрясение в Чили (27.02.2010 г.) с $M=8.8$ привело к гибели менее 500 человек и экономическому ущербу около 4 млрд. долларов США. Эти данные служат подтверждением того, что близкие по воздействию сейсмические события в менее развитых регионах вызывают существенно большие жертвы среди населения при уменьшении отношения ущерб/жертвы.

Наиболее полные мировые данные об ущербе от землетрясений доступны на сайте Национального центра данных Геологической службы США (*Significant Earthquakes*: <http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/eqlists>). Эта сводка представляет собой компиляцию данных о жертвах и экономических потерях от землетрясений, собранную из многочисленных источников, в том числе из [Lomnitz, 1994; Nelson, Ganze, 1980; Knopoff, Sornette, 1995] и ряда других публикаций.

Для пополнения представленной в таблице базы данных были отобраны сведения о величинах ущерба от землетрясений для стран, схожих с Киргизией по плотности населения, уровню сейсмичности и среднегодовому валовому внутреннему продукту (ВВП) на душу населения. При этом во внимание принимались страны с плотностью населения, которая не более чем в 1.5 раза отличалась от этого показателя для Киргизии. Относительно малые различия по уровню ВВП (не более двух раз) в большинстве случаев достигались привлечением данных по ущербу за более ранние годы.

В настоящей работе использованы данные за период с 1930 г. по настоящее время как представляющиеся наиболее достоверными. Для ряда событий в базе Национального центра данных США дано несколько часто существенно различных значений величины ущерба. В такой ситуации, как и ранее в [Родкин, Писаренко, 2000], принималось максимальное значение ущерба, если соответствующая запись не была заметно менее подробной по сравнению с другими. Мы полагаем, что такой подход в большинстве случаев обеспечивает отбор более достоверной информации. Форшоки и афтершоки не учитывались, значения ущерба относились к основному толчку.

Всего указанным способом были отобраны 129 случаев с известным числом жертв, 113 – с известным числом раненых, 153 – с известной величиной прямого экономического ущерба. Отобранные данные были объединены с соответствующими единичными значениями по территории Киргизии (см. таблицу); данные о жертвах при Кеминском землетрясении 1911 г. при моделировании не учитывались из-за их давности.

Для расчета ожидаемых величин ущерба рассматривались землетрясения с магнитудой $M \geq 5.8$. Всего на территории Киргизии, начиная с 1970 года, произошло 40 таких землетрясений (см. таблицу). Магнитуды, лежащие в интервале 5.8–6.4, соответствуют 8 баллам интенсивности в эпицентре по используемой в России и странах СНГ шкале *MSK-64*, принятой в США Модифицированной шкале Меркалли (*MM*) и Европейской макросейсмической шкале (*EMS*) [Мамыров и др., 2002]. В соответствии с этими шкалами, можно ожидать, что заметный ущерб должен быть связан только с землетрясениями, интенсивность которых не менее 8 баллов.

Далее рассматриваются землетрясения с магнитудами $M=6, 6.5, 7$ и т.д. с шагом ± 0.25 единиц магнитуды.

Значительная по площади часть территории Киргизии – малонаселенные высокогорные области. С учетом этого важно оценить, какая доля землетрясений с $M \geq 5.8$ будет приводить к реальному ущербу. Согласно имеющимся данным (см. таблицу), среди произошедших на территории Киргизии землетрясений с $M \geq 5.8$ число событий, для которых имеются упоминания о причиненном ущербе, составляет по погибшим 12% (5 землетрясений из 40), по раненым 15% (6 землетрясений из 40), по величине ущерба 35% (14 землетрясений из 40). При этом в большинстве случаев имеются только неясные указания: “погибло несколько человек”, “разрушены несколько домов”, “ранено несколько человек”. Наличие столь неопределенной информации позволяет предположить, что для ряда землетрясений данные об ущербе просто не сохранились.

В связи с вышесказанным мы сочли необходимым получить независимую оценку доли событий, вызывающих ущерб. Для этого были опрошены несколько экспертов, перед которыми ставился вопрос о том, какова, по их мнению, вероятность, что событие с магнитудой $M \geq 5.8$ приведет к безвозвратным потерям, появлению раненых, какому-либо материальному ущербу. Ответы экспертов различались между собой, но в среднем были близки к следующим: по безвозвратным потерям – 20%; по раненым – 25%; по величине материального ущерба – 45%.

Как мы и предполагали, оценки экспертов оказались выше полученных ранее на основе имеющихся данных каталогов по ущербам от землетрясений на территории Киргизии. При этом в обоих случаях максимальной оказалась доля событий, приводящих к материальному ущербу, и минимальной – приводящих к жертвам. Доля событий, приводящих к появлению раненых, выше доли землетрясений, приводящих к гибели людей. Из сказанного следует, что оценки доли землетрясений, приводящих к ущербу разного вида, полученные разными способами – по данным, приведенным в таблице, и по результатам опроса экспертов – качественно схожи. В целом, по указанным выше причинам, оценка доли приводящих к ущербу землетрясений, выполненная на основе табличных данных, представляется (весьма вероятно) заниженной. Напротив, оценка экспертов, часто опасаящихся занизить уровень опасности, может быть завышенной.

В приводимых далее расчетах нами использовались осредненные оценки доли землетрясений, приводящих к появлению ущерба разного вида [Давнис, Тинякова, 2005]:

$$\begin{aligned} &16\% \text{ – по погибшим,} \\ &20\% \text{ – по раненым,} \\ &40\% \text{ – по материальному ущербу.} \end{aligned} \tag{4}$$

Естественно предположить, что доля событий, вызывающих тот или иной ущерб, зависит не только от характера ущерба (убитые, раненые, материальные потери), но и от магнитуды события. Можно ожидать, что эта доля растет с увеличением магнитуды землетрясений. Однако уточнить эту зависимость для территории Киргизии весьма затруднительно в связи с малым объемом данных. Поэтому ниже мы пренебрежем этой вероятной зависимостью и будем полагать, что доля вызывающих ущерб событий от магнитуды не зависит.

Результаты расчета

Описанным выше способом были рассчитаны значения ожидаемых величин ущерба разного вида для территории Киргизии на срок от одного до 50 лет (мы полагаем, что в течение такого интервала времени основные социально-экономические характеристики не изменятся настолько, чтобы расчет оказался сильно искаженным). Расчет ожидаемого ущерба для интервала времени t лет осуществлялся по следующей схеме. Сначала с использованием формулы (2) оценивалось среднее число землетрясений заданной магнитуды, которые произойдут в выбранный интервал времени t лет. Затем с учетом доли событий, вызывающих ущерб данного вида, из (4) оценивалось число землетрясений, вызвавших ущерб. Исходя из этой, вообще говоря, дробной величины, определялось случайное целое число событий N , отвечающее распределению Пуассона с таким средним значением. Суммарная величина ущерба от землетрясений заданного интервала магнитуд за выбранный период t лет оценивалась суммой N выбираемых случайным образом значений ущерба из скомпилированной базы данных.

Формула расчета при численном моделировании величины ущерба U выглядит следующим образом:

$$U = \sum_{M=6}^9 \sum_{k=1}^N J(i). \quad (5)$$

В этой формуле суммирование выполняется по сумме интервалов значений магнитуд M от 6 до 9, а именно $5.75 \leq M < 6.25$, $6.25 \leq M < 6.75$, ... (ширина интервалов 0.50 единиц магнитуды). Для каждого интервала M суммируются величины ущерба, полученного от числа событий, определяемого как $N=Rtn$, где N – среднее число приносящих ущерб землетрясений данного интервала магнитуд (каждый раз используется целое число событий, отвечающее распределению Пуассона с интенсивностью N). В выражении (5) R – доля событий, вызывающих ущерб; t – длительность интервала прогноза (годы); n – среднее число событий за год по формуле (3); $J(i)$ – сумма величин ущерба ($i = 1, 2, \dots, N$) от N землетрясений с анализируемым интервальным значением M , которые случайным образом отбираются из базы данных.

Отметим, что, поскольку землетрясения для разных интервалов времени t выбираются случайно и независимо, а сами значения ущерба распределены по степенному закону, то, вообще говоря, возможны резко различающиеся случайные реализации. Реальный смысл имеют не конкретные случайные реализации, среди которых в связи со случайным выбором событий из базы данных на каждом этапе расчета могут встречаться даже реализации, уменьшающиеся со временем, а их статистические характеристики.

На рис. 3 приведены медианы величин ущерба (квантиль 50%) и квантили 16% и 84%, задающие интервал вероятностей, как при стандартном отклонении.

Можно видеть, что характер изменения роста со временем величин ущерба от землетрясений для территории Киргизии аналогичен полученному ранее по мировым данным (см. рис. 1). Для всех трех видов ущерба (см. рис. 3, а, б, в) наклон кривых $U(t)$ в двойных логарифмических координатах имеет тенденцию уменьшения с ростом t . Такой характер поведения кривых $U(t)$ соответствует тенденции смены степенного

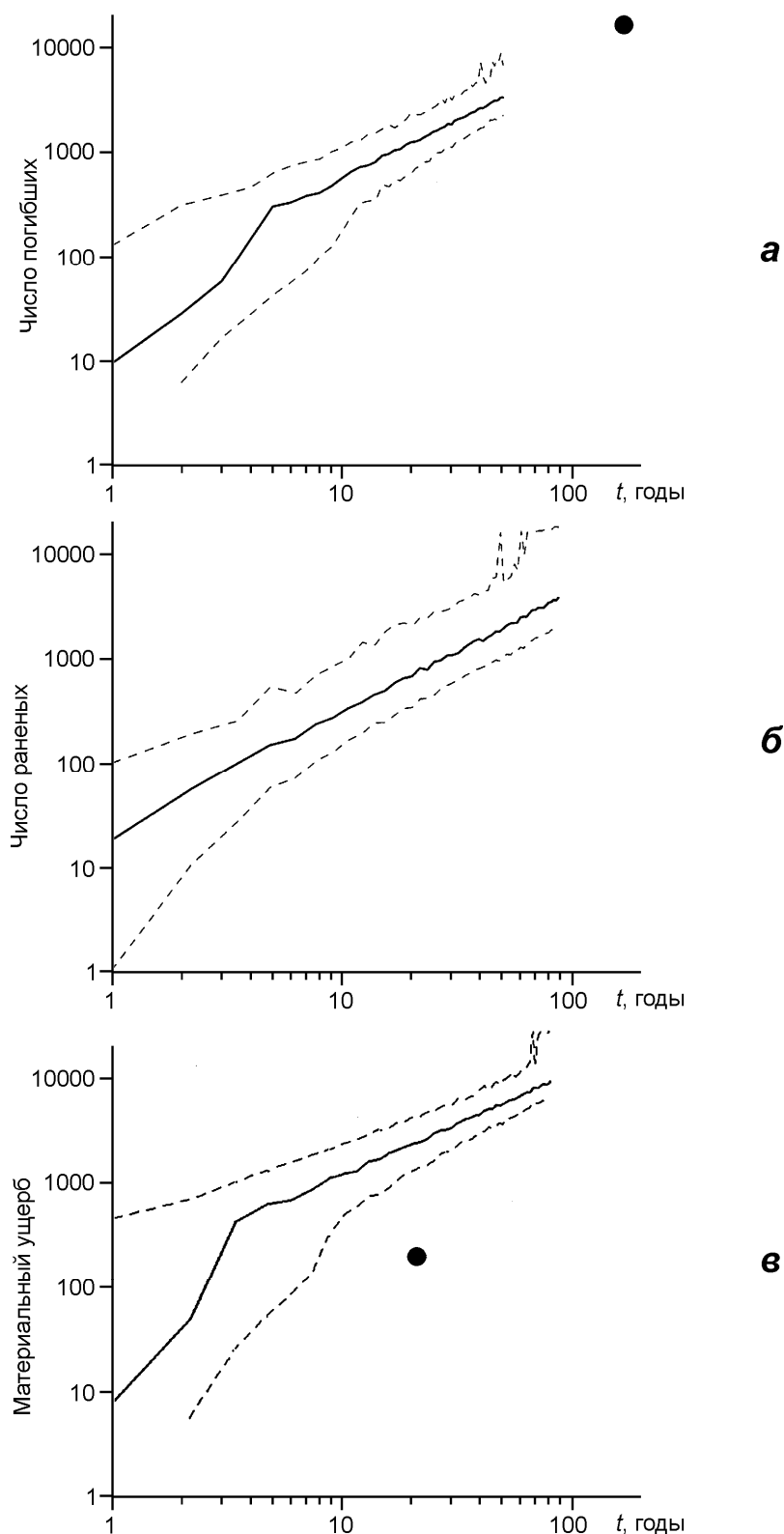


Рис. 3. Долгосрочный (до 50 лет) прогноз трех видов ущерба от землетрясений для Киргизской Республики: *а* – прогноз числа погибших, *б* – числа раненых, *в* – прямого экономического ущерба (L , млн. долл. США) Сплошная линия – медиана числа погибших, пунктиром даны квантили 16 и 84%. Залитый кружок на фрагменте *а* – данные по Кеминскому землетрясению 1911 г., на фрагменте *в* – данные по землетрясению 1992 г. с $M=7.5$, сильнейшему по причиненному ущербу

закона “распределения с тяжелым хвостом” (с параметром распределения $\beta \leq 1$) на другое (обычно неизвестное) распределение с конечным средним значением. Хорошо известным примером подобного изменения закона распределения является загиб вниз графика повторяемости Гуттенберга–Рихтера в области сильных землетрясений.

Изменение закона повторяемости и закона роста величин накопленного ущерба $U(t)$ связано с фундаментальной ограниченностью любого закона распределения, описывающего реально измеряемые характеристики. В нашем случае это изменение связано с фундаментальной ограниченностью величин ущерба, будь то число убитых, число раненых или величина экономического ущерба.

Приведенные на рис. 3 результаты численного моделирования позволяют оценить ряд статистических характеристик режима роста величин ущерба $U(t)$. Так, значение важного параметра α легко рассчитывается по формуле $U(t) \sim t^\alpha$ методом наименьших квадратов на основе полученных величин $U(t)$.

Оценки величины параметра $\alpha(t)$, рассчитанные для всех трех видов ущерба в интервалах времени от 1 года до t лет, приведены на рис. 4. Для всех видов ущерба наблюдается уменьшение значений $\alpha(t)$ с ростом длительности интервала времени t . Наименее регулярно ведет себя оценка числа раненых (см. рис. 3, б), что, видимо, связано с наименьшей статистической обеспеченностью такого рода данных. Видно также, что даже для интервалов времени длительностью в 50 лет значения $\alpha(t)$ остаются заметно больше 1 (они близки к 1.5). Такое поведение величин $\alpha(t)$ указывает [Писаренко, Родкин, 2007], что период повторяемости землетрясений с экстремально большим ущербом для территории Киргизии превышает 50 лет. Это заключение вполне ожидаемо. Кеминское землетрясение 1911 г., резко выделяющееся среди других по числу жертв, является единственным за 150 лет; следовательно, период повторяемости сильнейшей (по числу жертв) сейсмической катастрофы на территории Киргизии действительно превышает 50 лет. Наши данные показывают, что это заключение верно также для иных видов ущерба – и числа раненых, и материальных потерь.

Выше подчеркивалось, что известные единичные значения ущерба от землетрясений по территории Киргизии явно недостаточны для получения корректной оценки роста величин ущерба со временем. Однако есть возможность проверить, не противоречат ли имеющиеся данные по экстремальным значениям ущерба полученным графикам прогноза величин $U(t)$. Для степенных распределений вклад единичного

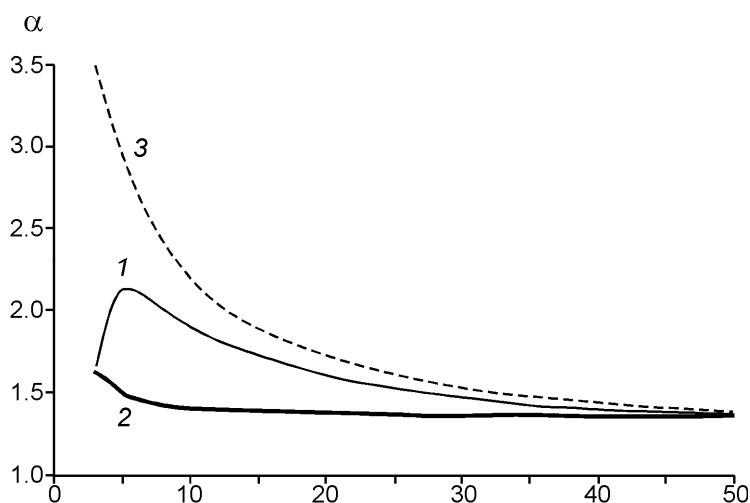


Рис. 4. Значения параметра α для интервалов времени $1-t$ лет для числа убитых (1), раненых (2) и материального ущерба (3)

максимального события сравним по порядку величины с суммарным эффектом за интервал времени повторяемости такого экстремального значения [Писаренко, Родкин, 2007]. Теоретически отношение суммарных величин ущерба к максимальному единичному значению для степенных распределений с $\beta < 1$ оценивается величиной $(1-\beta)^{-1}$; для типичных значений β это отношение равно 1.5–3.

Проверка согласованности получаемых прогнозных оценок суммарного ущерба с известными максимальными единичными величинами ущерба возможна, в первую очередь, для числа убитых. Как уже отмечалось, данные по Кеминскому землетрясению 1911 г., предположительно унесшему жизни 15 тыс. человек, не учитывались при расчете прогноза. Событий с приблизительно таким же числом жертв на территории Киргизии не было. За период достоверной информации о сильных землетрясениях (примерно с 1880 г.) произошли три события с близкой магнитудой – с $M=8.3$ в 1889 г., $M=8.2$ в 1902 г., $M=8.2$ в 1911 г. С учетом этих данных характерную повторяемость событий, сопоставимых по числу жертв с Кеминским землетрясением, можно оценить в 150–200 лет. На рис. 3, а залитым кружком отмечена точка, отвечающая числу жертв при Кеминском землетрясении (15 тыс. человек) и предположительному периоду повторяемости таких событий – 150 лет. Хорошо видно, что эта точка лежит на продолжении графика прогноза на соответствующий интервал времени.

Аналогичный вывод можно получить по данным о землетрясении 1992 г. с $M=7.5$, которое является сильнейшим по нанесенному им экономическому ущербу, составившему более 130 млн. долларов США. Период повторяемости подобного события положим равным периоду времени, для которого имеются данные (хотя бы и неполные) о величинах экономического ущерба – примерно 15–20 лет. На рис. 3, в можно видеть, что наблюдается разумное согласие этого отдельного максимального значения ущерба с прогнозом суммарных значений ущерба за 15 лет – они различаются примерно в 5 раз (при теоретически ожидаемом различии примерно в 2 раза). Отметим также, что меньшее, чем можно было бы ожидать, значение ущерба за ранние годы отвечает общей закономерности роста абсолютных значений экономического ущерба от природных катастроф со временем.

Таким образом, имеющиеся данные по максимальным значениям ущерба от землетрясений для территории Киргизии не противоречат прогнозу, рассчитанному на основе метода землетрясений-аналогов. Это дает основания полагать, что метод землетрясений-аналогов позволил получить правдоподобные прогнозные значения ущерба, которые вряд ли можно было бы получить каким-либо иным способом в связи с недостаточным количеством исходных данных.

Заключение

Еще раз подчеркнем, что в практическом отношении важен не только прогноз самих землетрясений, но и величины наносимого ими ущерба. Наиболее затребованы, по-видимому, оперативные прогнозы, необходимые для оценки последствий реализовавшегося сильного землетрясения и планирования необходимой экстренной помощи. Но актуально и получение долгосрочного (на десятилетия) прогноза ожидаемого ущерба. Такого рода оценки имеют большое значение на уровне отдельных стран для выработки планов мероприятий по уменьшению ущерба от природных катастроф, в том числе и от землетрясений.

Такой прогноз может быть получен на основе статистических данных об имевшем место в прошлом ущербе и на основе расчета сценариев возможных катастроф. Однако метод сценариев требует большого объема исходных данных о населении и инфраструктуре данной территории, которые отсутствуют для многих развивающихся стран.

Что касается метода расчета на основе величин ущерба при предыдущих катастрофах, то его применимость ограничена редкостью сильных природных катастроф.

Предложена методика оценки ожидаемого ущерба от редких сильных природных катастроф на национальном уровне с использованием данных об ущербе по другим территориям, близким к исследуемой по своим природным и социально-экономическим условиям. Методика реализована на примере оценки ущерба от землетрясений для территории Киргизии. Показано хорошее согласие полученного прогноза с имевшим место максимальным ущербом вследствие сильнейших событий прошлых лет.

Предложенная методика применима не только для оценки ущерба, наносимого землетрясениями, но и при расчете ущерба от других видов природных и техногенных катастроф. Существенное уточнение результатов расчетов ожидаемого ущерба возможно при переходе на локальный уровень, когда ущерб от природной катастрофы будет сопоставляться не со средними по данной стране значениями плотности населения и ВВП, а с локальными значениями плотности населения и стоимости объектов социо-и техносферы.

Отметим, что метод событий-аналогов мог бы быть полезен и для получения оперативной оценки ущерба от только что произошедшего события при отсутствии детальной информации о пораженной событием области, что не позволяет применить метод расчета сценария катастрофы [Rodkin, Pisarenko, Gvishiani, 2006].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-05-01039). Авторы признательны главному редактору журнала В.О. Михайлову и рецензенту В.Ф.Писаренко за замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Литература

- Давнис В.И., Тинякова В.В. Прогнозные модели экспертных предпочтений. Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2005. 245 с.
- Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д., Мелешко А.В., Жантаев М.М., Зубович А.В. Атлас землетрясений Кыргызстана. Бишкек: "ЦАИИЗ", 2009.
- Мамыров Э.М., Омуралиев М.О., Усупаев Ш.Э., Омуралиева А.М., Молдобеков Б.Д., Сарногоев А.К. Порядок долгосрочной оценки уровня сейсмической опасности на территории Кыргызской Республики. Бишкек: Наука и новые технологии, 2001. 14 с.
- Мамыров Э., Омуралиев М.О., Усупаев Ш.Э. Оценка вероятной сейсмической опасности территории Кыргызской Республики и приграничных районов стран Центральной Азии на период 2002–2005 гг. Бишкек: Аль салам, 2002. 94 с.
- Николаев С.М. Чрезвычайные ситуации и экологические проблемы. Новосибирск: "Гео", 2007. 379 с.
- Отчет ОМСЭ НАН КР 2006, сайт: seismolog_kg.narod.ru.
- Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска: Пособие для должностных лиц / Отв. ред. Г.А.Соболев, ФЦНТП ПП "Безопасность". М., 1997. 52 с.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Ущерб от землетрясений // Вычислительная сейсмология. 2003. Вып. 34. С.205–210.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС, 2007. Вып. 38. 240 с.
- Прогноз активизации опасных природных, техногенных процессов и предупредительные действия по обеспечению безопасности населения и территорий Кыргызской Республики на 2006 год. Бишкек: Министерство по ЧС КР, 2006. 39 с.
- Родкин М.В., Писаренко В.Ф. Экономический ущерб и жертвы от землетрясений: статистический анализ // Вычислительная сейсмология. 2000. Вып. 31. С.42–72.

- Родкин М.В.* Линейный и нелинейный режимы роста кумулятивного сейсмического момента. Физика Земли. 2005. № 2. С.3–13.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
- Aki K.* Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits // Bull. Earthquake Res. Ins. 1965. V. 43. P.237–239.
- Knopoff L., Sornette D.* Earthquake death tolls // J. Phys. I France. 1995. V. 5. P.1681–1688.
- Lomnitz C.* Fundamentals of Earthquake Prediction. N.-Y.: Willey, 1994. 220 p.
- Nelson J.B., Ganze R.A.* Significant earthquakes 1900–1979. NGSDC-NOAA. World Data Center A. 1980, Boulder. 20 p.
- Marzocchi W., Sandri L.* A review and new insights in the estimation of b -value and its uncertainty // Ann. Geophys. 2003. V. 46. P.1271–1282.
- Pisarenko V.F., Sornette D.* Statistical Detection and Characterization of a Deviation from the Gutenberg-Richter Distribution above Magnitude 8 // Pure Appl. Geophys. 2004. V. 161. P.839–864.
- Rodkin M.V., Pisarenko V.F.* Extreme earthquake disasters — verification of the method of parameterization of the character of distribution of the rare major events. Advances in Geosciences. 2006. V. 1. P.75–89.
- Rodkin M., Pisarenko V., Gvishiani A.* Prognosis of strong earthquake damage with minimum needed information. Proceedings of the International Disaster Reduction Conference, IDRC Davos 2006, Davos Switzerland August 27 – September 1. 2006. V. 2. P.462–464.
- Sornette D.* Critical phenomena in natural sciences. Berlin: Springer, 2000. 444 p.
- Woo G.* The Mathematics of Natural Catastrophes. London: Imperial College Press, 1999. 292 p.

Сведения об авторах

РОДКИН Михаил Владимирович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. Москва, 117997, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел: 8-926-324-9575. Факс: 8-495-333-4124. E-mail: rodkin@mitp.ru

СВАРОВ Мухамед Харсанович – адъюнкт академии гражданской защиты МЧС России. г.о. Химки, мкр-н Новогорск, 141435, АГЗ МЧС России, общ. 3, кв.10. Тел. 8-926-578-83-76. E-mail: msvarov@mail.ru

ESTIMATION OF EXPECTED SIZE OF DAMAGE FROM EARTHQUAKES FOR THE KIRGHIZIA

M.V. Rodkin, M.X. Svarov

¹ *International Institute of the Theory of Earthquake Prognosis and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

² *Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation, Moscow, Russia*

Abstract. Actual problem is the prognosis not only of earthquakes, but also of size of damage from earthquakes. Estimations of the size of expected damage are important in planning of a complex of actions on reduction of losses from earthquakes. The problem of an estimation of size of expected damage is a problem of an estimation of a total effect from the set of rare casual events extremely strong events including. Such problem has been resolved earlier at the global and regional scale. The use of the same approach at a national level is complicated however by lack of available data. The presented technique of an estimation of size of expected damage from a set of rare strong natural disasters at a national level is based upon of use of data from other regions similar with the examined one on the natural and social and economic conditions. The technique is described on an example of prognosis of size of damage from earthquakes for territory of the Kirghizia.

Keywords: natural disasters, earthquakes recurrence, mode of growth of losses from disasters.