

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИН УЩЕРБА НА ДОЛГОСРОЧНОЙ ОСНОВЕ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

М.В. Родкин, М.Х. Сваров

Оценки величин ожидаемого ущерба важны для разработки комплекса мероприятий по уменьшению потерь от землетрясений. Задача оценки величин ущерба относится к задачам оценки суммарного эффекта от случайной совокупности событий (в том числе и редких экстремально сильных).

Ключевые слова: землетрясение; природная катастрофа; ущерб; прогнозирование и оценка.

Землетрясения по своим разрушительным последствиям и количеству человеческих жертв занимают одно из первых мест среди природных катастроф. 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 оценки ожидаемых величин ущерба (количества убитых и раненых, величин экономических потерь). Такого рода оценки требуют большого набора статистических данных и ранее были получены только для мира в целом и для групп развитых и развивающихся стран¹. Для национальных правительств и региональных объединений наибольший интерес представляют, однако, не общемировые, а территориальные оценки величин ущерба на уровне отдельных стран и групп стран.

Для сейсмических катастроф, происходящих на территории Кыргызстана (также как и для

других территорий) характерен очень широкий диапазон масштабов, при этом редкие сильнейшие события приносят ущерб, сравнимый с суммарным ущербом от всех других (более слабых) землетрясений. Распределения, обладающие такой особенностью, называются распределениями с “тяжелым хвостом” и описываются степенными законами распределения². При степенном законе распределения (законе Парето) функция распределения $F(x)$ описывается соотношением:

$$F(x) = 1 - (c/x)^\beta; \quad x \geq c, \quad (1)$$

где параметры c и β удовлетворяют условию $c, \beta > 0$.

Для распределений с “тяжелым хвостом” аномально велика (по сравнению с привычным нормальным распределением) вероятность реализации экстремально больших событий. Связанной с этой особенностью степенных распределений с показателем степени распределения $\beta \leq 1$ является то, что среднее значение соответствующих распределений бесконечно³. Бесконечность среднего значения порождает неприменимость в этих случаях широко используемых

¹ Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычислительная сейсмология. – Вып. 38. – М.: ГЕОС, 2007. – 240 с.

² Sornette D. Critical phenomena in natural sciences. Springer. – Berlin, 2000. – 434 p.

³ Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Указ. соч.

статистических характеристик – среднего значения и дисперсии (значение дисперсии при степенных распределениях бесконечно при $\beta \leq 2$). При работе с распределениями с тяжелым хвостом следует использовать 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 нарастает со временем нелинейно.

В настоящей статье представлена методика получения оценки величин ущерба (количество погибших и раненых, прямые экономические потери) от сейсмических катастроф для территории отдельных стран. Метод основывается на использовании данных об ущербе от землетрясений для других территорий с близкими социально-экономическими условиями. Расчет дан на примере территории Кыргызской Республики.

Методика оценки величин ущерба. Предлагаемый алгоритм получения оценок величин ущерба от сильных сейсмических событий включает три основных этапа работ:

- анализ сейсмического режима территории Кыргызской Республики на основе каталога землетрясений с целью уточнения параметров графика повторяемости землетрясений;
- анализ имеющихся данных по величинам ущерба для территории КР и (ввиду явной недостаточности такой информации) для оценки ожидаемых величин ущерба; подбор мировых аналогов значений ущерба;
- численное моделирование величин ущерба в зависимости от времени, с выдачей долгосрочного (на 50 лет) прогноза значений ущерба на территорию КР.

Кратко поясним смысл этих трех этапов, а затем перейдем к описанию исходных данных, процедуры и результатов их обработки.

Первый этап предусматривает получение (или использование уже имеющихся) робастных оценок значений периода повторяемости землетрясений различной магнитуды для территории КР. Для получения графика повторяемости в области событий средней силы, целесообразно использовать данные, начиная с создания сети сейсмических наблюдений в 60-х гг. XX в. Для оценки же режима повторяемости редких сильных землетрясений следует использовать данные по сейсмическому режиму, как минимум, с начала XX в.

Второй этап направлен на выяснение характера статистической связи между силой зем-

летрясения и значениями ущерба для данной территории. Данные по КР по величинам ущерба от землетрясений единичны и не позволяют провести статистическое оценивание ожидаемых величин ущерба. Поэтому нами были использованы мировые данные по ущербам от землетрясений, происшедших на территориях с близкими сеймотектоническими и социально-экономическими условиями. Обоснование и описание этого нового подхода приведено ниже.

Третий этап получения прогноза величин ущерба отвечает собственно процедуре расчета прогноза на основе двух сформированных ранее массивов данных по сейсмическому режиму и по режиму величин ущерба от землетрясений. Для расчета прогноза была реализована численная имитационная модель, когда 1) число землетрясений данной магнитуды задавалось Пуассоновским распределением со средним значением, отвечающим графику повторяемости землетрясений, 2) учитывалась доля сейсмических событий, произошедших в ненаселенной местности и потому не приносящих ущерба и 3) ожидаемое значение ущерба определялось случайной выборкой из базы данных для значений ущерба от событий данной магнитуды.

Учитывая степень надежной регистрации землетрясений на территории КР и то, что заметные величины ущерба связаны только с относительно более сильными событиями, мы ограничились рассмотрением землетрясения с магнитудой более 5; при этом использовался региональный каталог землетрясений Кыргызской Республики¹. Графики повторяемости для землетрясений умеренной силы (магнитуды от 5.25 до 7.25) за 1965–2009 гг. и для редких сильных землетрясений за 1900–2009 гг. представлены на рис.1. Обобщая представленные эмпирические зависимости в единый закон повторяемости землетрясений Гуттенберга–Рихтера, получаем для территории КР соотношение:

$$\lg(n) = -0.8M + 5, \quad (2)$$

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

Использование классического закона Гуттенберга–Рихтера типа (2) общепринято в практике оценки сейсмической опасности различных территорий.

Величины ущерба от землетрясений принято характеризовать тремя параметрами: безвозвратными потерями (числом погибших), числом

¹ Кальметьева З.А. Атлас землетрясений Кыргызстана. – Бишкек: Учкун, 2009.

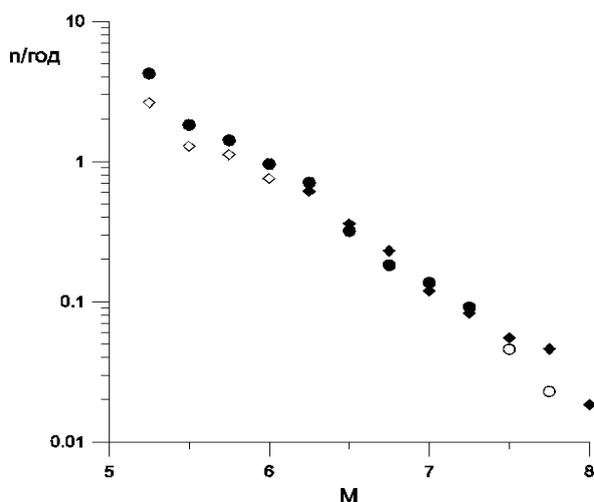


Рис. 1. Данные по повторяемости сильных (ромбы) и умеренных по магнитуде землетрясений (кружки). Залитые значки отвечают данным, использованным при расчете параметров графика повторяемости.

раненых и величиной прямого экономического ущерба. Подобного рода сведения для территории КР носят отрывочный характер, и в ряде случаев явно не точны. Так, например, для Суусамырского землетрясения указано 74 погибших, при этом наличие раненых не отмечается и как бы указывается на их отсутствие. Такого рода информация представляется заведомо неправдоподобной, и для дальнейшего анализа были использованы только случаи явного указания на величины ущерба. Отметим также, что в советское время, сообщая о случившихся землетрясениях, часто занижали их балльность и величины ущерба. Некоторые катастрофические землетрясения силой 9–10 баллов, например Ашхабадское 1948 г., полностью разрушившее город, практически обошли молчанием в прессе. Многие о нем узнали много лет спустя¹.

Данных по величинам ущерба от землетрясений для территории Кыргызской Республики явно недостаточно для робастной оценки ожидаемых величин ущерба. Поэтому с целью расширения статистики были привлечены мировые данные по ущербу от землетрясений, произошедших на территориях с близким (активным) сейсмическим режимом и аналогичной социально-экономической ситуацией. Необходимость учета последней свя-

¹ Николаев С.М. Чрезвычайные ситуации и экологические проблемы. – Новосибирск: Гео, 2007.

зана с тем, что, как известно, величины ущерба от землетрясений сильно зависят (в статистическом смысле) не только от силы сейсмического воздействия, но и от социально-экономической ситуации, имеющей место на данной территории². Так, землетрясение на Гаити 12 января 2010 г. с магнитудой 7 привело к гибели более 220000 человек и материальному ущербу более 8 млрд. долл. США. Аналогичное по силе землетрясение 3 августа 2009 г. в США с магнитудой 6.9 обошлось без жертв, а разрушительное землетрясение в Чили (27 февраля 2010 г. с магнитудой 8.8) привело к гибели менее 500 человек и экономическому ущербу около 4 млрд. долл. США. Наиболее полные мировые данные об ущербе от землетрясений доступны на сайте Национального центра данных геологической службы США³. Эта сводка представляет собой компиляцию данных о жертвах и экономических потерях от землетрясений, собранную из многочисленных источников⁴.

Для пополнения базы данных по ущербу были отобраны сведения о величинах ущерба от землетрясений для стран, схожих с Кыргызстаном по плотности населения, уровню сейсмичности территорий и среднегодовому валовому внутреннему продукту на душу населения. Плотность населения должна была отличаться не более чем в 1,5 раза. Требуемый интервал допустимых различий среднегодового ВВП (не более 2-х раз) достигался в большинстве случаев использованием данных по ущербу за прошлые годы.

Всего указанным способом были отображены данные по 134 случаям с известным числом жертв, 116 случаям с известным числом раненых, и 155 значений прямого экономического ущерба. Эти данные были объединены в единый файл с соответствующими единичными значениями по территории Кыргызской Республики.

Для расчета ожидаемых величин ущерба были рассмотрены землетрясения с магнитудой $M \geq 5.8$. Магнитуды в интервале 5.8–6.4 соответствуют 8 баллам интенсивности в эпицентре по используемой в России и странах СНГ шкале MSK-64, по принятой в США Модифицированной шкале Меркалли (ММ) и по Европейской

² Родкин М.В., Писаренко В.Ф. Экономический ущерб и жертвы от землетрясений: статистический анализ // Вычислительная сейсмология. – 2000. – Вып. 31. – С. 42–72.

³ Significant Earthquakes: <http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/eqlists>

⁴ Lomnitz, 1994; Nelson, Ganze, 1980; Knopoff, Sornette, 1995 и др.

макросейсмической шкале (EMS)¹. Из определения шкал балльности можно ожидать, что заметный ущерб может быть связан только с землетрясениями с интенсивностью не менее 8 баллов, т.е. с магнитудами $M \geq 5.8$. Всего на территории Кыргызской Республики, начиная с 1970 г., произошло 41 землетрясение с $M \geq 5.8$.

Важно оценить теперь (учитывая наличие в Кыргызстане значительных малонаселенных высокогорных территорий), какая доля землетрясений с $M \geq 5.8$ будет приводить к ущербам. Согласно имеющимся данным, среди землетрясений с $M \geq 5.8$, произошедших на территории республики, число событий, для которых имеются упоминания о причиненном ущербе составляет:

- по убитым – для 5 землетрясений из 41, т.е. для 12% случаев;
- по величине ущерба – 14 из 41, 35% случаев;
- по раненым – 6 из 41, 15% случаев.

В большинстве случаев имеются только неясные указания типа: “погибло несколько человек”, “разрушены несколько домов”, “ранено несколько человек”. Наличие столь неопределенной информации позволяет предположить, что для ряда землетрясений информация об ущербе могла просто не сохраниться.

Для получения независимой оценки 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. Согласно средним оценкам экспертов, такая вероятность составляет: по жертвам – 20%; по величине ущерба – 45%; по раненым – 25%.

Экспертные оценки оказались выше полученных ранее на основе имеющихся данных каталогов по ущербам от землетрясений на территории Кыргызской Республики.

В приводимых далее расчетах нами использовались осредненные оценки доли приводящих к появлению ущерба землетрясений, которые выглядят следующим образом²:

- по безвозвратным потерям – 16%;
- по величине ущерба – 40%;
- по раненым – 20%.

¹ Мамыров 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.

² Давнис В.И., Тинякова В.В. Прогнозные модели экспертных предпочтений. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005.

Естественно предположить, что доля событий, вызывающих тот или иной ущерб, зависит не только от характера ущерба (убитые, раненые или материальные потери), но также и от магнитуды события. Можно предположить, что эта доля растет с увеличением магнитуды землетрясений. Однако получить такую уточненную зависимость для территории Кыргызстана, из-за недостатка данных, весьма затруднительно. Поэтому ниже мы будем пренебрегать этой вероятной зависимостью и полагать долю вызывающих ущерб событий независимой от магнитуды.

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

Таким образом, формула расчета при численном моделировании величин ущерба U выглядит следующим образом:

$$U = \sum_{M=6}^9 \sum_{k=1}^N J(i), \quad (3)$$

где $N = R \times t \times n$ – среднее число сейсмических событий данной магнитуды $M (\pm 0.25)$; каждый раз используется целое число событий, отвечающее распределению Пуассона со средней интенсивностью n .

R – доля событий, вызывающих ущерб;

t – длительность интервала прогноза (годы);

n – среднее число событий за год по формуле (2): $\lg(n) = -0.8M + 5$;

$J(i)$ – известное значение ущерба для события случайного номера i из базы данных для событий данного интервала магнитуд $M (\pm 0.25)$.

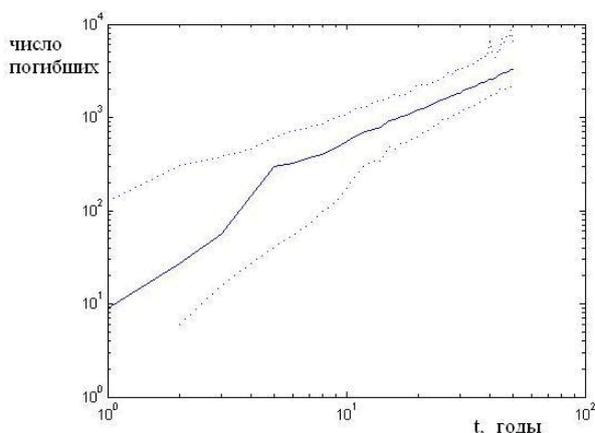


Рис. 2. Оценка количества погибших на долгосрочный период (50 лет).

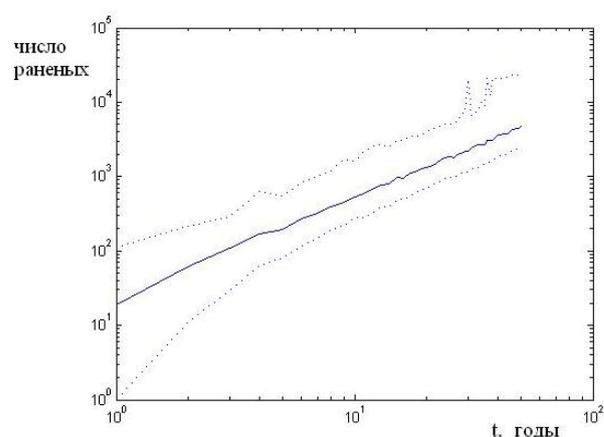


Рис. 3. Оценка количества раненых на долгосрочный период (50 лет).

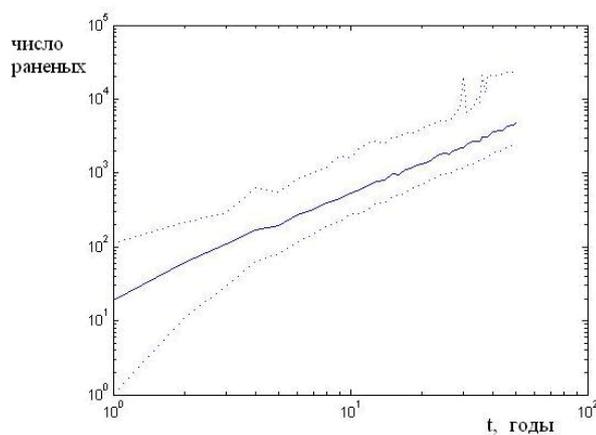


Рис. 4. Оценка ущерба на долгосрочный период (50 лет).

Отметим, что поскольку землетрясения для разных интервалов времени t выбираются случайно и независимо, а сами значения ущерба распределены по степенному закону, то возможны и резко различающиеся случайные реализации. Реальный смысл имеют не конкретные случайные реализации, а их статистические характеристики. На рис. 2–4 приведены медианы величин ущерба (квантиль 50%) и квантили 16 и 84%, отвечающие интервалу вероятностей как при привычном нормальном разбросе.

Как видно на рис. 2–4, характер изменения закона роста величин ущерба от землетрясений для территории Кыргызской Республики аналогичен полученному ранее по мировым данным. Для всех трех видов ущерба наклон кривых роста $U(t)$ в двойных логарифмических координатах имеет тенденцию уменьшаться с ростом

t . Такой характер изменения закона роста величин $U(t)$ со временем соответствует тенденции смены степенного 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. При этом между параметром степенного закона β и параметром α выполняется соотношение: $\alpha = 1/\beta^1$. Изменения

¹ 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. – Vol. 1, ch. 08. – P. 75–89.

закона повторяемости и закона роста величин накопленного ущерба $U(t)$ связаны 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 или раненых или величин экономического ущерба.

Приведенные на рис. 2–4 результаты численного моделирования позволяют оценить ряд важных статистических характеристик режима роста величин ущерба. Значение параметра a легко рассчитывается по формуле $U \sim t^a$ методом наименьших квадратов на основе полученных величин $U(t)$. На рис. 5 приведены оценки величин параметра $a(t)$, рассчитанные для всех трех видов ущерба для интервалов времени от 1 до t лет. Для всех видов ущерба наблюдается уменьшение значений a с ростом длительности интервала времени t . Наименее регулярно ведет себя оценка для числа раненых, что может быть связано с наименьшей статистической обеспеченностью такого рода данных. Видно также, что даже для интервалов времени длительностью в 50 лет, значения $a(t)$ остаются заметно большими единицы (близкими к 1.5). Такое поведение величин $a(t)$ указывает, что период повторяемости землетрясений с экстремально большими значениями ущерба для территории республики превышает 50 лет¹. Впрочем, такое заключение вполне ожидаемо. Действительно, Кеминское землетрясение 1911 г. резко выделяется среди других землетрясений по числу жертв и является единственным подобным событием на интервале времени до 150 лет; отсюда следует, что период повторяемости сильнейшей (по числу жертв) сейсмической катастрофы на территории КР больше 50 лет. Наши данные показывают, что это заключение верно также для иных видов ущерба: числа раненых и материальных потерь.

Важной в практическом отношении задачей является прогноз не только землетрясений, но и величин ущерба от них. Наиболее востре-

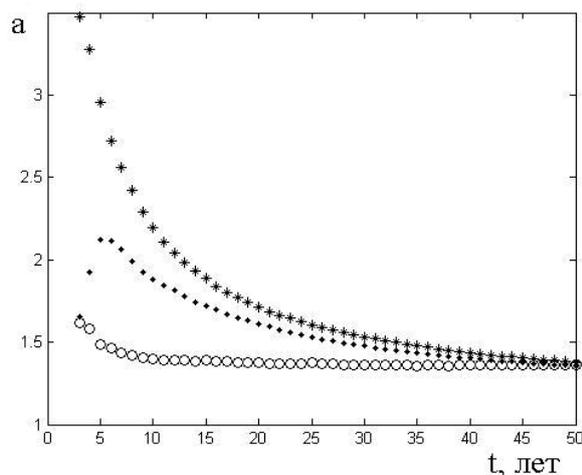


Рис. 5. Значения параметра a для интервалов времени $1-t$ лет, рассчитанные для числа убитых (точки), раненых (кружки) и материального ущерба (звездочки).

бованы оперативные оценки, необходимые для оценки последствий реализовавшегося сильного землетрясения и планирования необходимой экстренной помощи. Актуальна и задача получения долгосрочного (на десятилетия) прогноза ожидаемых значений ущерба. Такого рода оценки наиболее востребованы на уровне отдельных стран для выработки планов мероприятий по уменьшению ущерба от природных катастроф (в частности, от землетрясений). Получение таких оценок затруднено из-за недостатка статистических данных о величинах причиненного в прошлом ущерба для каждой отдельной страны.

Таким образом, на примере величин ущерба от землетрясений для территории Кыргызской Республики предложена и реализована методика оценки величин ожидаемого ущерба от редких сильных природных катастроф на основе использования данных по ущербу по другим странам.

Предложенная методика применима не только для случая землетрясений, но и при расчете ущерба от других видов природных (и техногенных) катастроф.

¹ Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Указ. соч.