

УДК.550.348

Абдрахматов К. Е., Фролова А. Г.,
Першина Е. В., Берёзина А. В.
Институт сейсмологии НАН КР
г. Бишкек, Кыргызстан

О ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ БАТКЕНСКОЙ ОБЛАСТИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ РАЙОНОВ В ПИКОВЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЯХ ГРУНТА

Аннотация: В статье приведена модель сейсмической опасности Баткенской области и прилегающих к ней районов. Исследования основаны на данных о сейсмичности территории, характеристиках активных разломов и эмпирических соотношениях затухания ускорений грунта. Результаты представлены в виде вероятностных карт в пиковых ускорениях грунта, унифицированных спектров и среднегодовых кривых опасности.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, активные разломы, площадные источники, затухание ускорений грунта, вероятностные карты, средние спектры.

БАТКЕН РАЙОНУНУН ЖАНА ЧЕКТЕШ РАЙОНДОРДУН СЕЙСМИКАЛЫК КООПТУУЛУГУНУН ЧОКУСУ ЖАНА ЖЕРДИН СПЕКТРАЛДЫК ТЕЗДЕНУҮЛӨРҮНҮН ЫКТЫМДЫГЫН БААЛОО ЖӨНҮНДӨ

Кыскача мазмуну. Макалада Баткен облусунда жана ага чектеш аймактарда сейсмикалык коркунучтун модели берилген. Изилдөө аймактын сейсмикалуулугу, активдүү жаракалардын мүнөздөмөлөрү жана жер үстүндөгү ылдамдануу басаңдоосунун эмпирикалык байланыштары жөнүндөгү маалыматтарга негизделген. Натыйжалар жердин эң жогорку ылдамданууларынын ыктымалдык карталары, бирдиктүү спектрлер жана орточо жылдык коркунуч ийри сызыктары түрүндө берилген.

Негизги сөздөр: сейсмикалык коркунуч, активдүү жаракалар, аймактын булактары, жердин ылдамдануусунун басаңдашы, ыктымалдык карталары, орточо спектрлер.

ABOUT PROBABILISTIC ASSESSMENT OF SEISMIC HAZARD OF THE BATKEN REGION AND ADJACENT AREAS IN PEAK AND SPECTRAL GROUND ACCELERATIONS

Abstract. The model of seismic hazard of the Batken region and adjacent areas is presented in the paper. The study is based on data on seismicity of this territory, characteristics of active faults and empirical relationships of attenuation of ground accelerations. The results in the form of probability maps in peak accelerations of ground, uniform spectra and average annual hazard curves are presented.

Keywords: seismic hazard, active faults, area sources, attenuation of ground accelerations, probability maps, mean spectra.

Относительно всей территории Кыргызстана Баткенская область отличается средним уровнем сейсмической активности: исторически на её территории катастрофических землетрясений не было зарегистрировано. К настоящему моменту максимальным по энергии считается Исфара-Баткенское землетрясение 31 января 1977 г. с $M = 6.3$. Однако, прилегающие районы, особенно южные, обладают большим сейсмическим потенциалом и учёт их возможного воздействия на территорию Баткенской области является необходимым условием оценки её сейсмической опасности.

На нормативной Карте сейсмического районирования территории Кыргызстана 2011 г. Баткенская область с учётом данных по тектонике и палеосейсмодислокациям отнесена

к 8-ми и 9-балльной зонам интенсивности возможных землетрясений. В качестве элемента вероятности на карту нанесены периоды повторяемости сотрясений [1]. На ныне действующей Карте сейсмической опасности (2019 г.) немного изменилась конфигурация зон 8 и 9-балльной интенсивности и приведены возможные колебания грунта в ускорениях на основе известных корреляционных соотношений [2]. При построении этих карт был использован детерминистский подход. В настоящее время практически во всех странах был осуществлён переход на использование вероятностного подхода к оценке сейсмической опасности территории, который соответствует современным международным стандартам в области сейсмостойкого строительства. Реализация работы по вероятностной оценке территории Баткенской области и приграничных районов стала возможной благодаря опыту, полученному в результате участия Института сейсмологии НАН КР в международном проекте МНТЦ КР 2398.

Для оценки сейсмической опасности были использованы два вида сейсмических источников: площадные зоны, выделенные по распределению сейсмичности, и линейные зоны, определённые по активным разломам. Такой комбинированный подход позволил учесть как региональные, так и локальные эффекты, связанные с активными тектоническими структурами. Необходимо уточнить, что *активные разломы*, как источники сейсмической опасности, включают в себя определённый набор параметров: особенности их простирания на карте, сдвигах, геометрии, кинематике и скорости геологического скольжения [4, 5], а *площадные источники* представляют собой зоны, выделенные по распределению сейсмичности. Расчёты выполнялись с использованием программы Openquake Engine [3]. В связи с высоким уровнем сейсмичности приграничных, особенно южных, районов территория исследований была расширена примерно на 100 км и более от границы Баткенской области (рисунок 1).

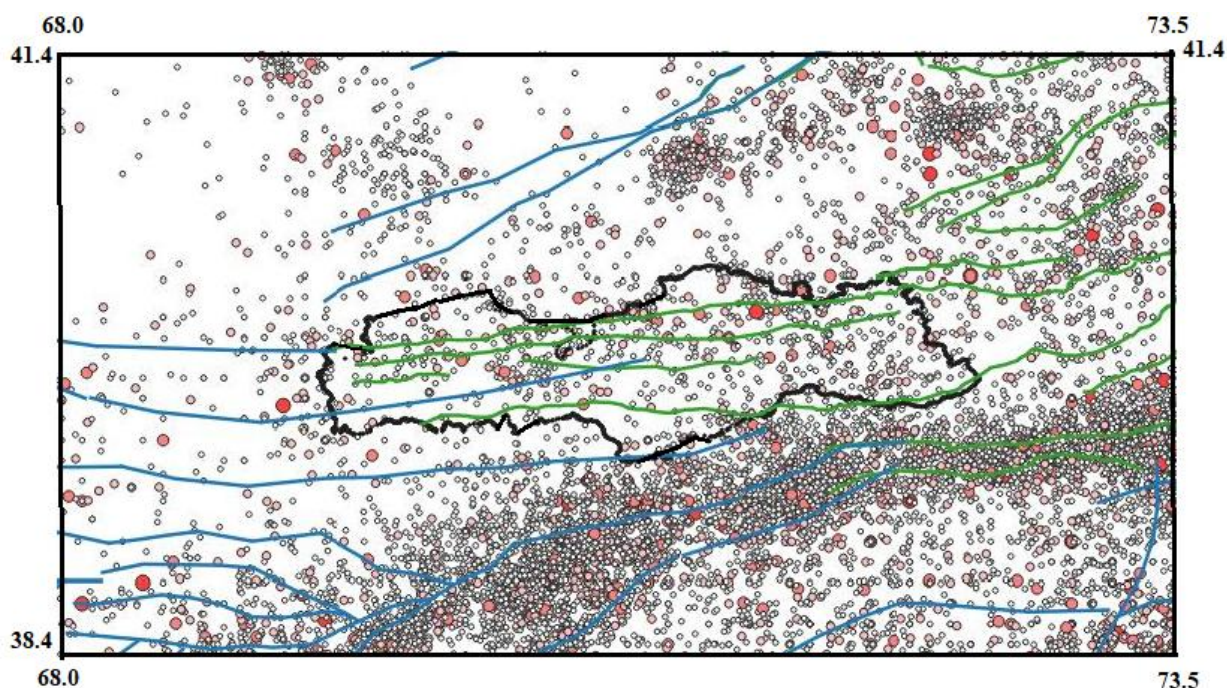


Рисунок 1. Схема активных разломов на фоне эпицентров землетрясений. Зелёным цветом обозначены активные разломы Кыргызстана [4], синим — Таджикистана [5]. Граница Баткенской области выделена чёрным цветом.

Для оценки сейсмичности был использован каталог землетрясений Баткенской области и прилегающих районов, как выборка из уточнённого каталога CASHA-BU, полученного в результате выполнения проекта МНТЦ КР 2398 [6]. Каталог включил в себя

9354 землетрясений в диапазоне магнитуды $M_w = 3.2 \div 7.6$. Максимальная магнитуда $M_w = 7.6$ относится к катастрофическому Хаитскому землетрясению 1949 года. По распределению сейсмичности было выделено 46 зон (рисунок 2). Сейсмичность внутри границ этих зон предполагается как однородная. При выделении этих зон кроме сейсмичности в определённой мере учитывались простирание активных разломов и расположение крупных городов. В качестве параметров сейсмичности использовались данные графиков повторяемости Гутенберга-Рихтера, построенные для каждой зоны. Примеры таких графиков приведены на рисунке 3. Экспериментальные точки на графиках могут быть аппроксимированы двумя способами: вероятностной прямой, которая опирается на начальную часть с малыми магнитудами, или прямой, построенной методом наименьших квадратов и учитывающей весь диапазон магнитуд. Выбор способа аппроксимации зависит от сходимости точек. Кривая на графике, помеченная квадратиками, ограничивает выбранную за основу аппроксимирующую прямую с учётом принятой для зоны максимальной магнитуды.

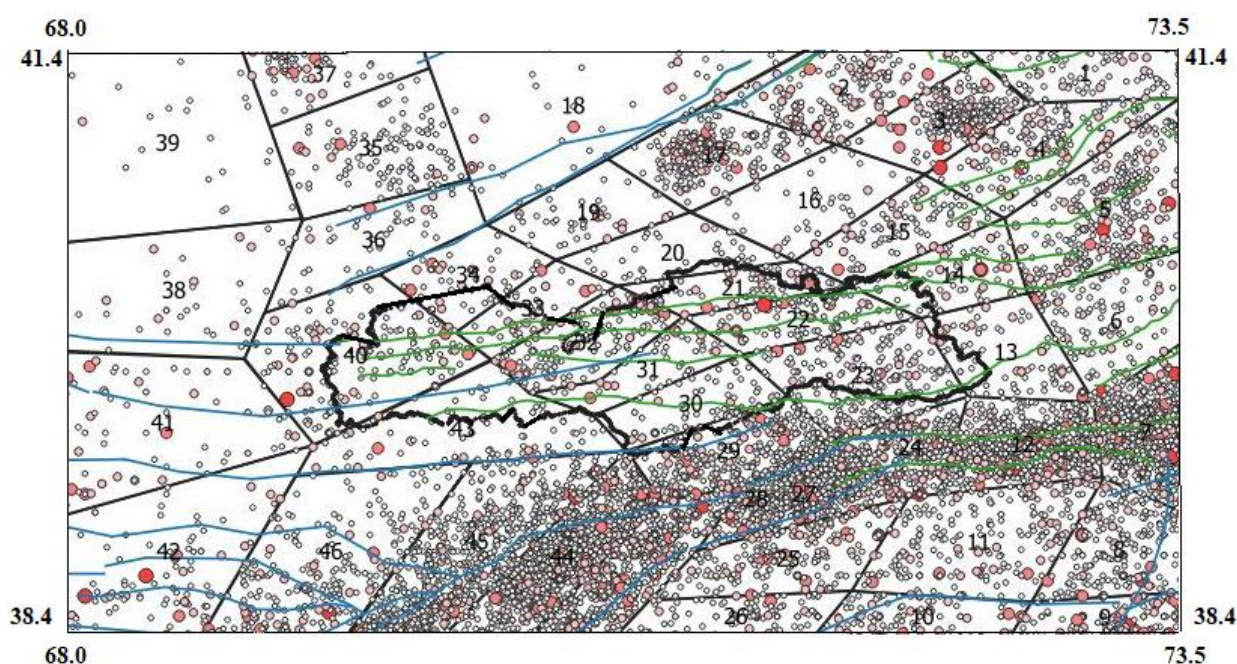


Рисунок 2. Схема зонирования Баткенской области и прилегающих территорий по распределению сейсмичности.

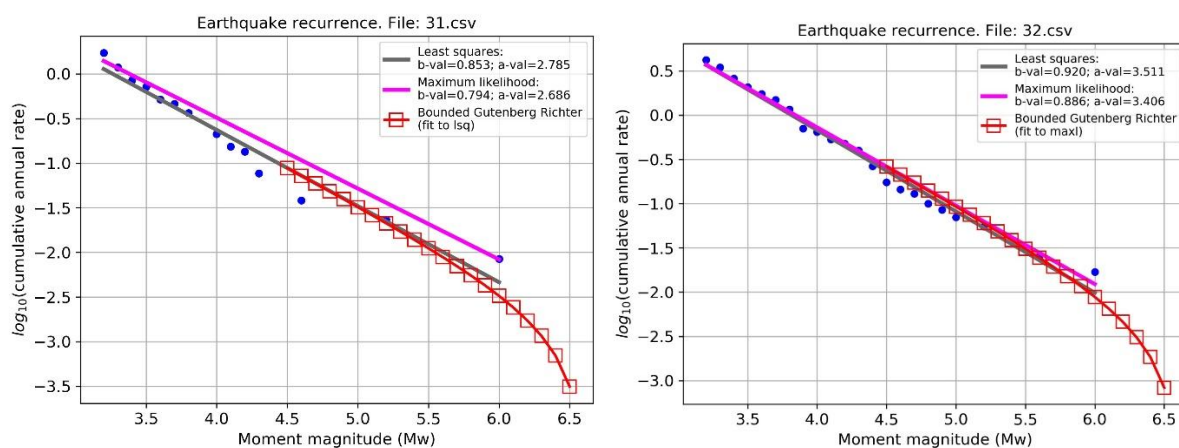


Рисунок 3. Графики повторяемости землетрясений для зон 31 (слева) и 32 (справа).

При построении графиков повторяемости кроме выбора типа аппроксимирующей прямой задаётся ещё и максимальное значение моментной магнитуды M_w для зон. При создании модели оценки опасности с использованием параметров активных разломов и площадных источников полагают, что активные разломы ответственны за опасность от более сильных событий, в то время как зоны характеризуют сейсмическую опасность от землетрясений меньшей магнитуды. В качестве минимальной магнитуды практически для всех разломов Кыргызстана принято значение $M_w = 6.5$. При наличии разлома в конкретной зоне максимальная магнитуда для этой зоны берётся равной $M_w = 6.6$. В этом случае не будет значительного разрыва между влиянием на опасность обоих источников, а при перекрытии магнитуд — ошибочного увеличения опасности за счёт двойного учёта источников. В том случае, когда в границах зоны отсутствуют активные разломы, в качестве максимальной магнитуды берётся максимальная наблюдаемая в данной зоне магнитуда. Максимальная магнитуда M_w определена и фиксирована для каждого разлома.

Преобладающие глубины очагов землетрясений. Исходя из общей проблемы точности определения глубины очагов, мы разделили распределение глубин для каждой зоны на три слоя: близкий к поверхности (от 0 до 7.5 км) со средним значением 5 км, от 7.6 до 12.5 км со средним 10 км, далее — от 12.6 до 17.5 со средним 15 км. Но из двух последних выбирали один слой, преобладающий по количеству событий — 10 км или 15 км. Третий слой определяли по преобладанию глубин. Для каждого слоя по количеству значений придали определённую весовую функцию. Всё это позволило создать некую общую картину распределения очагов землетрясений с учётом глубины.

Преобладающие параметры механизмов очагов землетрясений. Эта задача оказалась более сложной, чем предыдущие. Для каждой зоны нужно включить в программу Openquake преобладающие для неё параметры механизма очага: *strike* — угол простирания плоскости подвижки от направления на север, *dip* — угол падения плоскости подвижки от горизонтали, *rake* — угол между вектором подвижки и простиранием. Известно, что в результате определения механизма очага землетрясения получают две равновероятные плоскости разрыва. Уже только в этом есть элемент неопределённости. Для всех землетрясений зоны имеется множество указанных выше параметров, на основании которых нужно найти два-три решения, преобладающие для этой зоны, и придать им определённое весовое значение. В случае относительно близких значений параметров находилось усреднённое решение. При значительных вариациях параметров принимались во внимание решения для наиболее сильных землетрясений зоны. Были использованы данные о механизмах очагов землетрясений за период с 1990 по 2018 гг. [7].

Уравнения затухания пиковых ускорений грунта. Одним из важнейших условий выполнения всей этой работы является наличие для исследуемой территории закона затухания ускорений колебаний грунта. За период функционирования аналоговой сети сильных движений в Кыргызстане с 1970 г. по 2008 г. были получены, в основном, записи смещений, в меньшей мере — скоростей и лишь единичные записи ускорений. Из всего массива данных по сильным движениям было отобрано 13 наиболее пригодных для анализа записей, из них 4 записи ускорений, 3 записи скоростей и 6 записей смещений. Все четыре записи ускорений принадлежат Суусамырскому землетрясению 1992 г. с $M_w=7.2$. Говорить о законе затухания на основе собственных данных пока не имеет смысла. Для данной работы речь идёт о выборе одного или нескольких известных моделей затухания, полученных в других регионах мира, которые наиболее соответствуют нашим экспериментальным данным.

На рисунке 4 приведён пример сопоставления ожидаемых кривых затухания ZhaoEtAl2016 GMPE [8] при $M=7.2$ со значениями пиковых ускорений грунта и спектральных амплитуд на периодах 0.2 с., 0.5 с., 1.0 с., полученными по записям Суусамырского землетрясения на станциях «Фрунзе», «Юрьевка», «Аркит», «Ош» на расстояниях от разломов 121 км, 139 км, 143 км и 188 км соответственно. Экспериментальные точки, в основном, лежат внутри доверительного интервала кривых затухания. Данные в ближней зоне отсутствуют, что значительно усложняет выбор закона затухания.

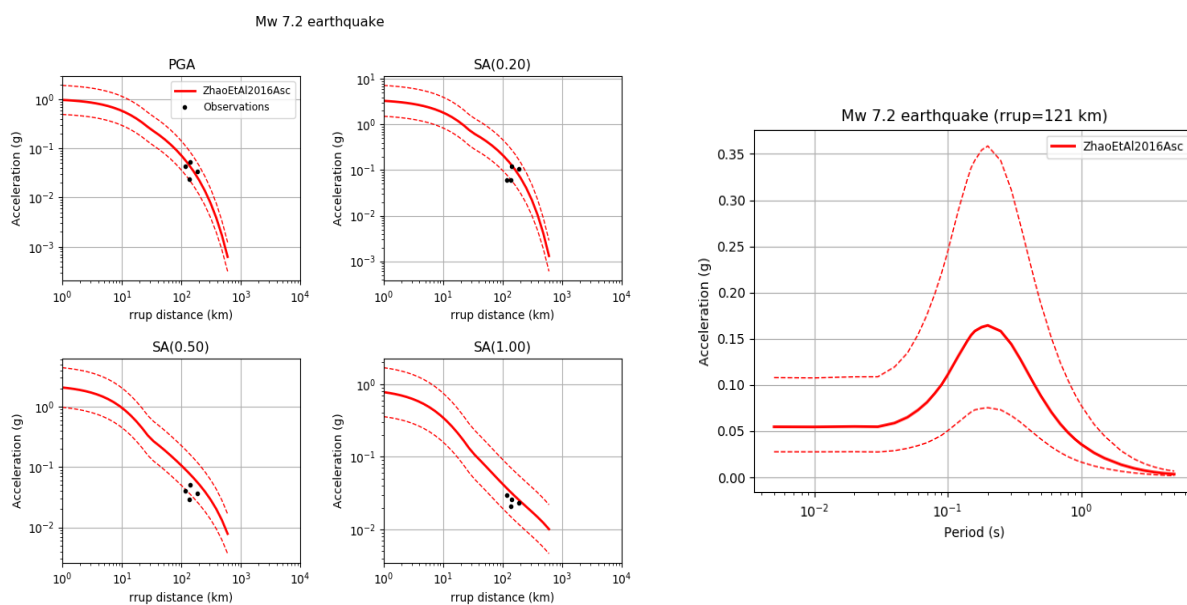


Рисунок 4. Слева: кривые затухания пиковых ускорений грунта и спектральных амплитуд на периодах 0.2 с., 0.5 с., 1.0 с. согласно модели ZhaoEtAl2016 GMPE [8] для магнитуды $M_w = 7.2$; точками показаны соответствующие значения экспериментальных данных по записям ускорений при Суусамырском землетрясении. Справа показан ожидаемый спектр ускорений согласно модели ZhaoEtAl2016 GMPE для станции «Фрунзе» на расстоянии 121 км от разлома.

На рисунке 5 приведены ожидаемые спектры ускорений при фиксированных расстояниях 5 км, 20 км, 50 км, 100 км и магнитудах $M_w=5.0$, $M_w=6.0$, $M_w=7.0$, $M_w=8.0$. Такое представление данных позволяет зафиксировать, как меняется уровень спектров с расстоянием и магнитудой в зависимости от принятых соотношений затухания. Уровень спектров согласно модели ZhaoEtAl2016 GMPE [8] остаётся высоким в диапазоне магнитуд $M_w = 5.0-7.0$. Для $M_w=8.0$ высокий уровень спектра наблюдается для модели AbrahamsonEtAl2014 [9]. Используя несколько моделей и находя для них среднее решение, можно получить более точный результат.

Таким образом, при выборе соотношений затухания, наиболее удовлетворяющих нашим экспериментальным данным, предпочтение было отведено следующим пяти моделям затухания пиковых ускорений грунта с определёнными для них весовыми значениями: ZhaoEtAl2016 [8] (0.1), AbrahamsonEtAl2014 [9] (0.225), AkkarBommer2010 [10] (0.225), BooreEtAl2014 [11] (0.225), ChouYoungs2014 [12] (0.225) (рисунки 4 и 5).

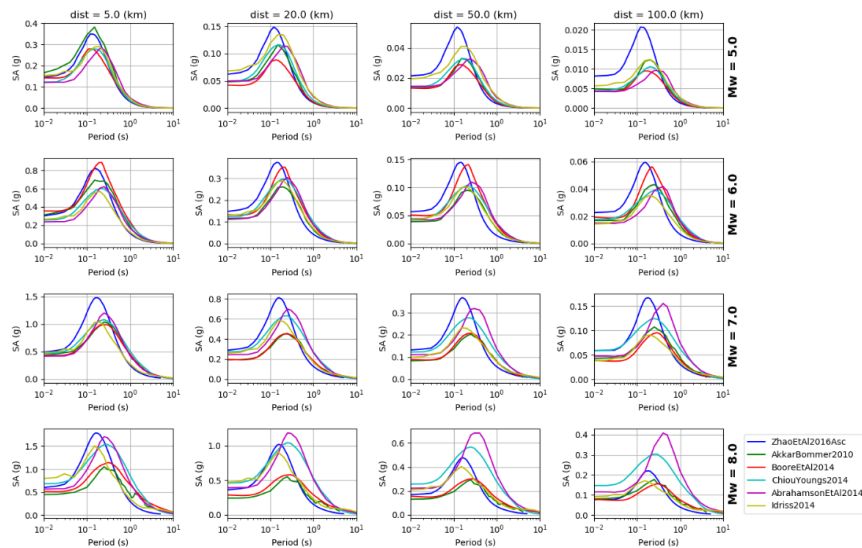


Рисунок 5. Ожидаемые спектры ускорений в зависимости от расстояний и магнитуды при показанных цветом в легенде разных соотношениях затухания.

Полученные результаты.

В расчётах участвовали все пять моделей затухания, на основании которых в зависимости от принятых значений весовых значений получено среднее решение. Карты сейсмической опасности для 2% и 10% вероятности превышения за время ожидания 50 лет в терминах пиковых ускорений грунта представлены на рисунках 6 и 9. Вероятность 2% соответствует периоду повторяемости 2475 лет, 10% - периоду повторяемости 475 лет.

На карте с 2% вероятностью превышения высокими значениями пиковых ускорений грунта (0.7–0.8 g) отличаются зона к юго-западу от Бакена и зона между Кадамжаем и Айдарканом, простирающаяся с северо-запада на юго-восток. На приграничной территории Таджикистана и Китая ускорения грунта могут достигать 0.95 g (рисунок 6). Основные закономерности распределения параметров опасности сохранились и для 10%- вероятности превышения (рисунок 9), но значения их меньше, поскольку они связаны с более коротким периодом повторяемости. На рисунке 7, 8 и 10, 11 приведены карты сейсмической опасности для 2% и 10% вероятностях превышения на время ожидания 50 лет в терминах спектральных ускорений грунта, рассчитанных для периодов 0.2 с. и 1.0 с. Самые высокие ускорения грунта ожидаются на периодах 0.1с и 0.2с. (рисунки 7, 10, 12).

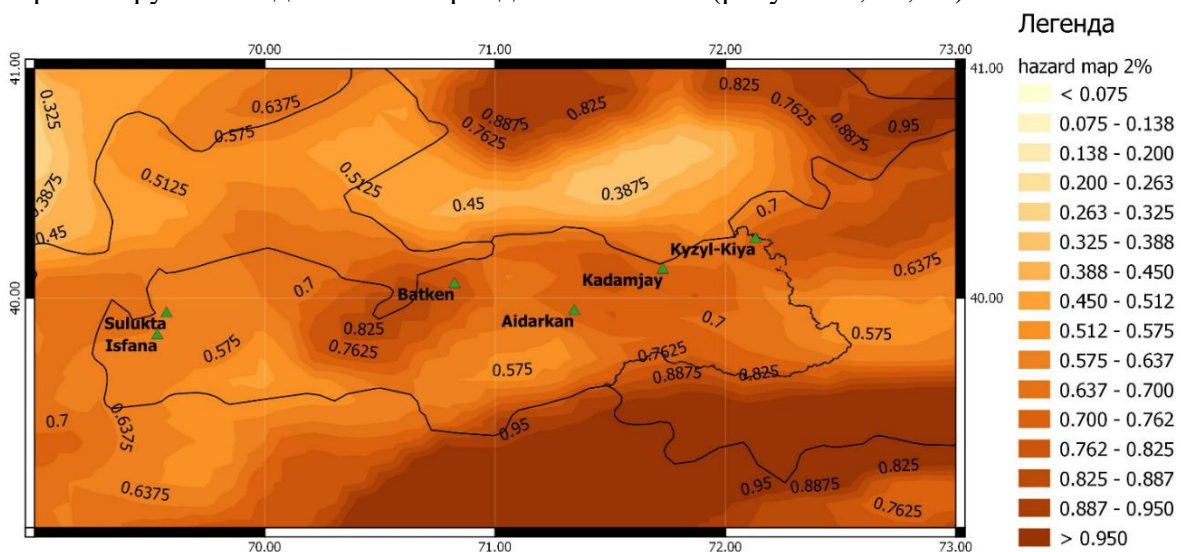


Рисунок 6. Карта сейсмической опасности с 2% вероятностью превышения за время ожидания 50 лет в терминах пиковых ускорений грунта.

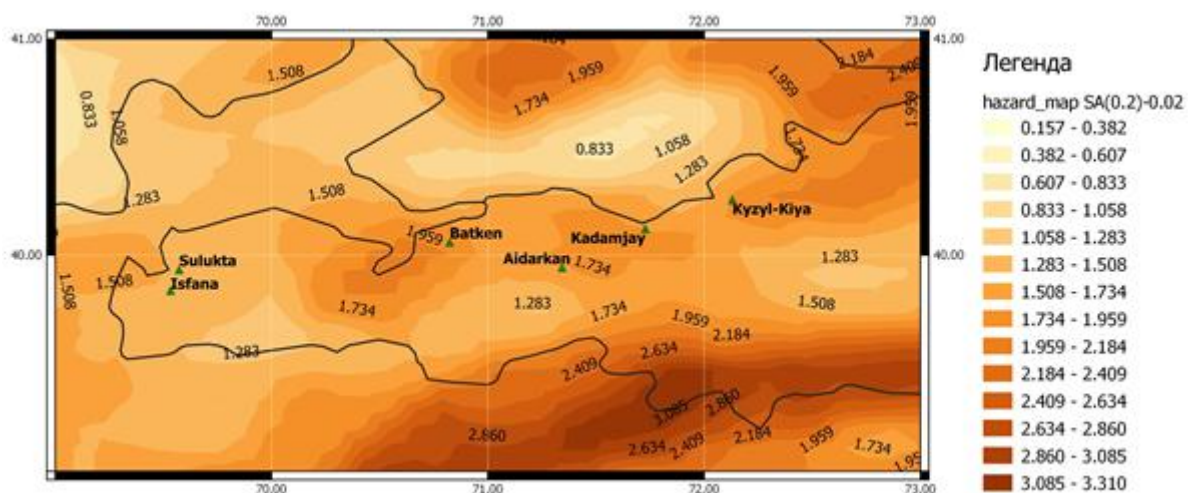


Рисунок 7. Карта сейсмической опасности с 2% вероятностью превышения за время ожидания 50 лет в терминах спектральных ускорений грунта на периоде 0.2 с.

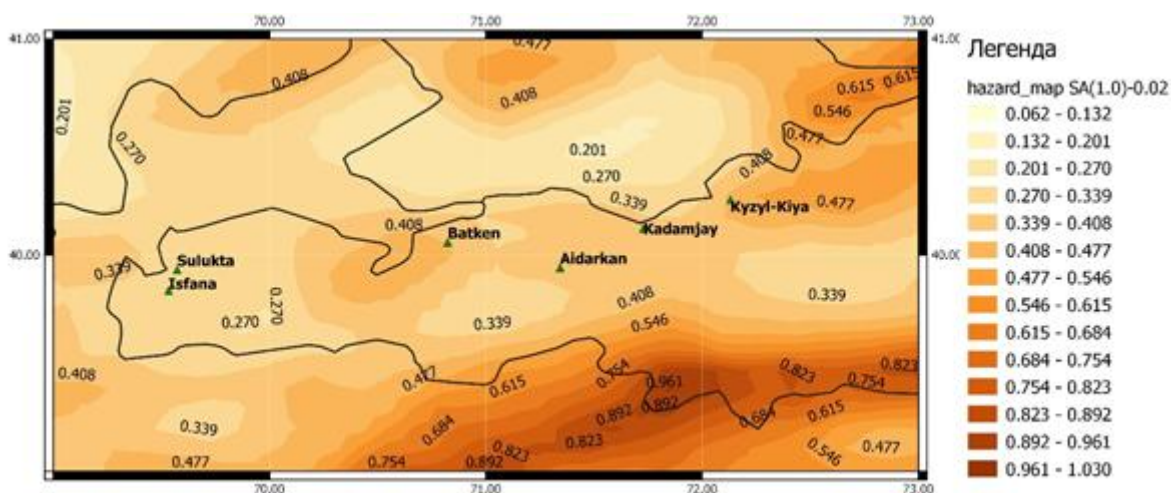


Рисунок 8. Карта сейсмической опасности с 2% вероятностью превышения за время ожидания 50 лет в терминах спектральных ускорений грунта на периоде 1.0 с.

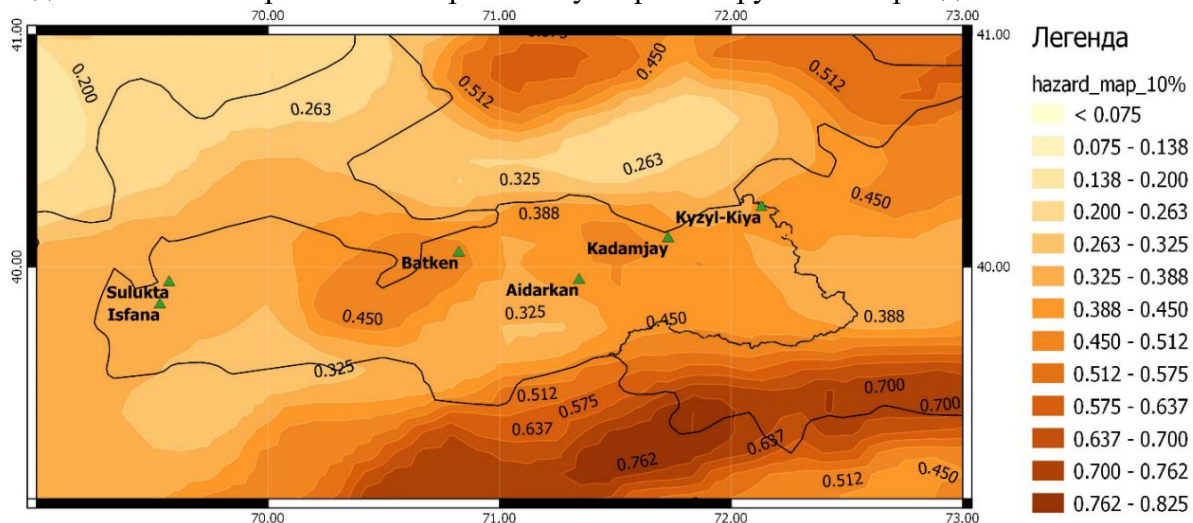


Рисунок 9. Карта сейсмической опасности с 10% вероятностью превышения за время ожидания 50 лет в терминах пиковых ускорений грунта.

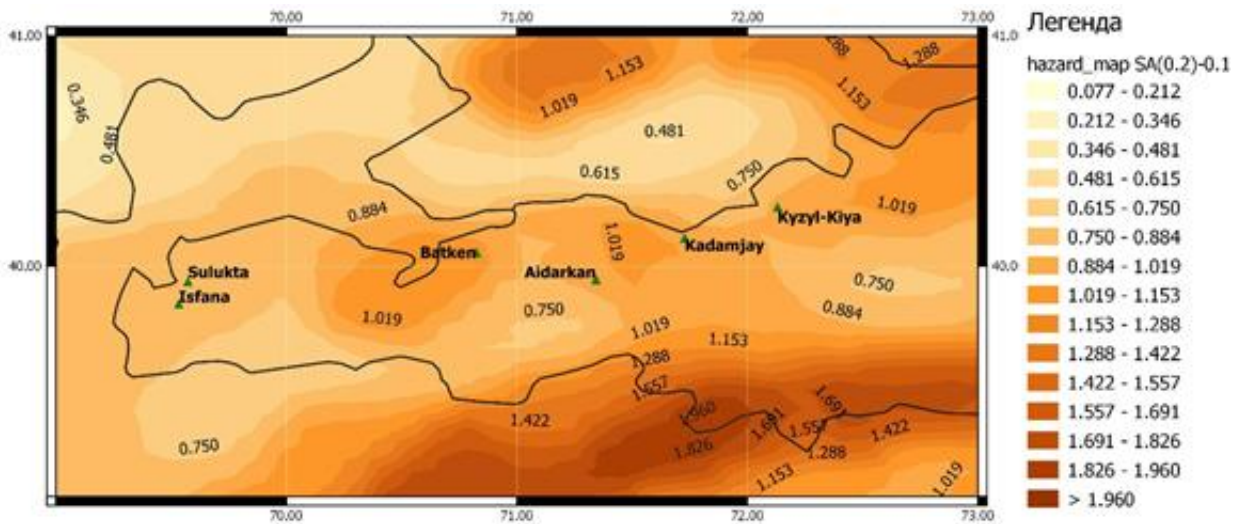


Рисунок 10. Карта сейсмической опасности с 10% вероятностью превышения за время ожидания 50 лет в терминах спектральных ускорений грунта на периоде 0.2 с.

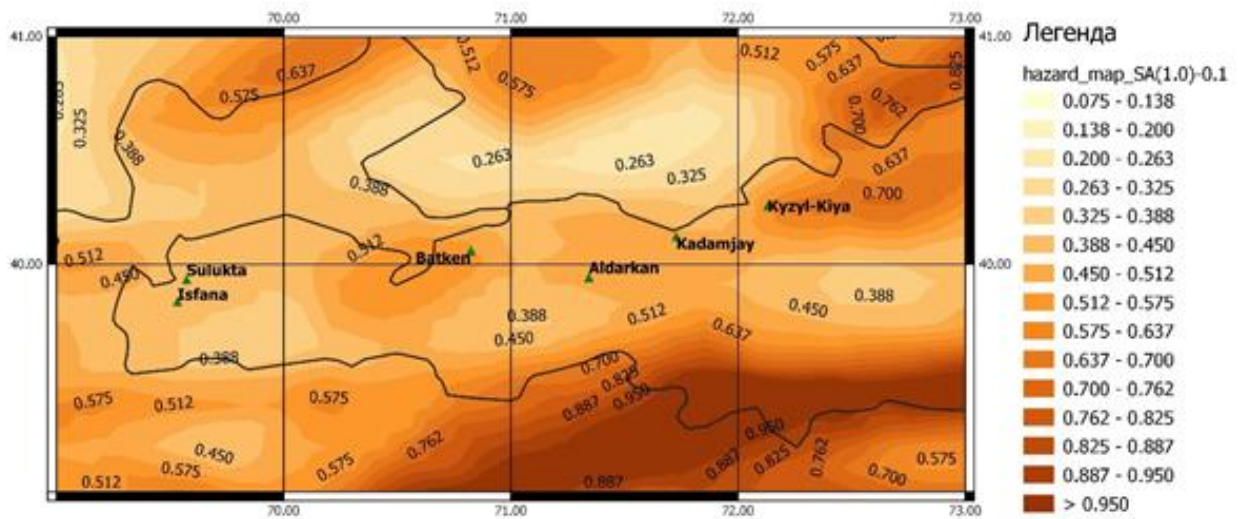
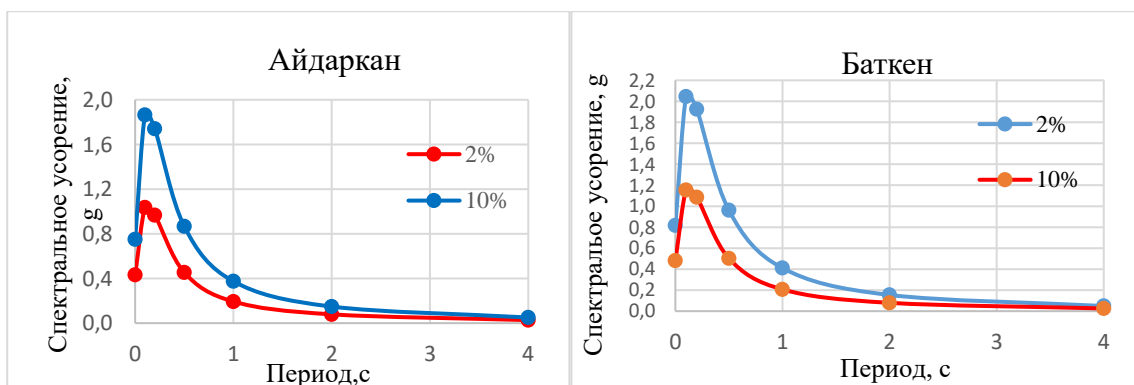


Рисунок 11. Карта сейсмической опасности с 10% вероятностью превышения за время ожидания 50 лет в терминах спектральных ускорениях на периоде 1.0 с.

На рисунке 12 показаны унифицированные спектры для четырёх городов Баткенской области с вероятностью превышения 2% и 10% за время ожидания 50 лет. Максимальные ускорения для всех городов могут наблюдаться на периодах 0.1 и 0.2 с., при этом наиболее уязвимым в сейсмическом отношении является г. Баткен. При 10%-ой вероятности превышения ускорения на этих периодах могут достигать 1.2 g.



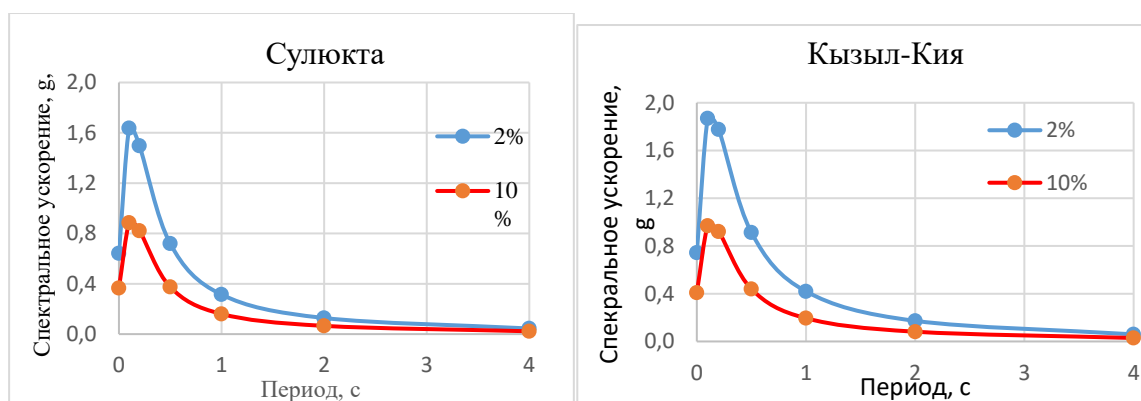


Рисунок 12. Унифицированные спектры реакции для четырех городов Баткенской области с вероятностью превышения 2% и 10% за время ожидания 50 лет.

Ещё один параметр, который характеризует сейсмическую опасность городов в пиковых ускорения грунта — среднегодовая кривая опасности (рисунок 13). Например, среднегодовая вероятность превышения ускорения $0.1g$ для самого уязвимого из четырёх городов Баткена составляет всего 0.04 .

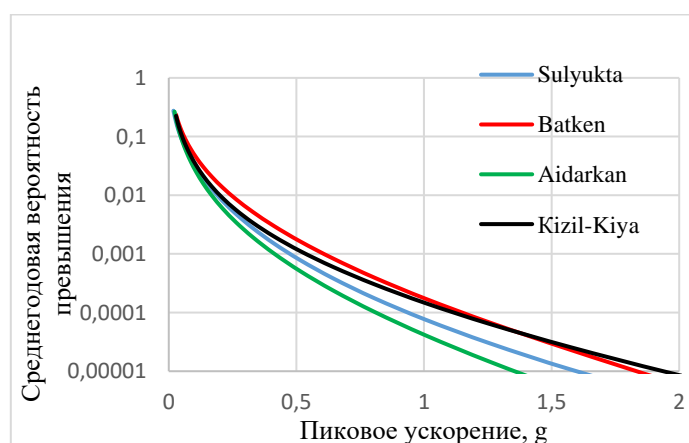


Рисунок 13. Среднегодовые кривые опасности для четырех городов Баткенской области в пиковых ускорениях грунта.

Полученные вероятностные оценки сейсмической опасности Баткенской области превышают ожидаемые, приведённые на ныне действующей карте районирования [2], согласно которой ускорения даже для девятибалльных зон района исследований не превышают $0.4 g$. В последние годы в исследованиях по макросейсмике появились данные о занижении ускорений в корреляции с балльностью. В частности, в работе [13] отмечено, что при изменении интенсивности колебаний от 8 до 9 баллов значения пиковых ускорений могут изменяться от $0.28 g$ до $0.74 g$ при стандартном отклонении 0.6 . С другой стороны, при выполнении этой работы были приняты определённые допущения, в частности, при выборе моделей затухания из мирового Банка данных. Наличие достаточного количества записей сильных землетрясений в своем регионе позволило бы уточнить полученные результаты анализа. В настоящее время сеть сильных движений Кыргызстана постепенно возрождается в новом цифровом качестве: современные приборы для регистрации сильных движений функционируют уже на 21-й сейсмической станции, из них 15 акселерографов были установлены только за последние два года. Идёт постепенное накопление данных для создания своей модели затухания пиковых ускорений грунта, отвечающим сеймотектоническим условиям Кыргызстана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахматов К. Е., Джанузаков К. Д., Фролова А. Г., Погребной В.Н. Карта сейсмического районирования Кыргызской Республики. Масштаб 1: 1 000 000. Объяснительная записка. Бишкек: Илим, 2011, с. 24.
2. Абдрахматов К.Е., Омуралиев М., рецен. А., Захожая Н.Г. Карта интенсивности сотрясений земной поверхности в баллах при вероятных максимальных землетрясениях на территории Кыргызстана. 2018 г.: www.seismo.kg
3. OpenQuake// <https://www.globalquakemodel.org/parneps>
4. Активные разломы Кыргызстана. // Фонды Института сейсмологии НАН КР.
5. Активные разломы Таджикистана. //Фонды Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Академии наук Таджикистан.
6. Tuna Onur, Rengin Gok, Kevin Maskey, Ken Abrams, Anna Berezina, Natalya Mikhailova, Bayan Bekturganova, Shohrukh Murodkulov, Istvan Bondars, Carlos Herrera. Central Azia Seismic Hazard Assessment (CASHA) «Compleat» Catalog of earthquakes.
7. Механизмы очагов землетрясений Кыргызстана и прилегающих территорий //Фонды Института сейсмологии НАН КР.
8. John X. Zhao, S. Zhou, J. Zhou, C. Zhao, H. Zhang, Y. Zhang, P. Gao, X. Lan, D. Rhoades, Y. Fukushima, et al.2016. Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(4):1552–1569.
9. Abrahamson N.A., W.J. Silva, and R. Kamai 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. Earthquake Spectra, 30(3):1025–1055.
10. Akkar, S. and J.J. Bommer, 2010. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. Seismological Research Letters, 81(2):195–206.
11. Boore D.M., J.P. Stewart, E. Seyhan, and G.M. Atkinson 2014. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. Earthquake Spectra, 30(3):1057–1085.
12. Chiou, B.S.J. and Youngs, R.R. 2014. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. Earthquake Spectra, 30(3):1117–1153.
13. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука, 2012.

Рецензент: к.г.-м. н. Омуралиева А. М.