

УДК 550:34:550.4 (575.2)

Джанабилова С.О¹, Абдрахматов К.Е²¹Институт сейсмологии Республики Казахстан, г. Алматы²Институт сейсмологии НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Аннотация. Сравнение исследований, проведённых в рамках различных проектов, по оценке сейсмической опасности территории Центральной Азии показывает, что результаты имеют явные различия в терминах уровня сейсмической опасности, хотя при этом расположение районов с наивысшей опасностью совпадают. Очевидно, что различия, главным образом, связаны с разным сейсотектоническим районированием.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, оценка, методы, районирование, землетрясение.

СЕЙСМИКАЛЫК КОРКУНУЧКА БАА БЕРҮҮДӨ КОЛДОНУЛА ТУРГАН МЕТОДДОР ЖАНА ЫКМАЛАР

Кыскача мазмуну. Борбордук Азиянын аймагындагы сейсмикалык коркунучка баа берүү боюнча ар түрдүү долбоорлордун алкактарында жүргүзүлгөн изилдөөлөрдү салыштыруу, жыйынтыктар сейсмикалык коркунуч деңгээли терминдеринде ачык эле айырмачылыктарга ээ экендигин көрсөтүп турат, бирок мында эң жогорку коркунучу бар райондордун жайгашуусу дал келдишип турушат. Балким, айырмачылыктар, башкысы, ар түрдүү сейсотектоникалык райондоштуруу менен байланышкан.

Негизги сөздөр: сейсмикалык коркунуч, баа берүү, методдор, райондоштуруу, жер титирөө.

METHODS AND APPROACHES USED FOR SEISMIC HAZARD ASSESSMENT

Abstract. A comparison of investigations carried out in the frame of different projects of seismic hazard assessment of the Central Asia territory showing us that results have obvious differences in seismic hazard level while location of high hazard areas is the same. It is obvious that these differences are connected with different seismotectonic zoning.

Keywords: seismic hazard, assessment, methods, zoning, earthquake.

В настоящее время при оценке сейсмической опасности различных территорий используются в основном два подхода: детерминистский и вероятностный.

Термин «сейсмическая опасность» означает вероятность проявления потенциальных разрушений от сейсмических колебаний земной поверхности в определённом месте в течение определённого интервала времени. Согласно другому определению «сейсмическая опасность – вероятность возникновения (превышения или непревышения) сейсмического эффекта определённой величины (обычно измеряется по 12-балльной шкале интенсивности) в данном пункте в течение заданного интервала времени» [1]. Таким образом, задача оценки сейсмической опасности сводится к составлению карт сейсмического районирования заданной территории в заданном масштабе.

Детерминистская оценка сейсмической опасности в значениях пиковых ускорений грунта PGA и в значениях балльности по шкале MSK-64 определяет величину сейсмических воздействий при максимально возможных землетрясениях, но с очень

маленькой вероятностью (для промышленных и гражданских сооружений 1 раз в 2500 лет, для ответственных сооружений, включая большие плотины 1 раз в 10 000 лет.

Такая оценка проводилась раньше методом экспертной оценки, теперь проводятся с помощью компьютерных программ.

Как известно, составленные ранее карты сейсмического районирования территории Кыргызской Республики основывались на идее комплексного подхода к районированию, с учётом геологических, геофизических и сейсмологических данных. Эта идея была воплощена в практику при составлении комплексной карты сейсмического районирования Чуйской впадины в 1975 году. Дальнейшее развитие этой методики получило при составлении карт сейсмического районирования Иссык-Кульской впадины, Северовостока и Юго-запада Ошской области, крайнего востока Кыргызстана и других районов [2,3].

Преимущество указанного метода анализа заключалось в том, что он позволяет оценивать возможную сейсмическую опасность не только тех структур, которые уже испытали оживление или вновь возникли в последние 30 млн. лет, но и тех, активизация которых вероятно при данной тенденции развития процессов неотектоники. Последнее обстоятельство представляется весьма важным, поскольку позволяет прогнозировать вероятность активизации древних разломов в тех районах, где неотектонические процессы в рельефе проявлены слабо или совсем не выражены.

Действующая ныне нормативная карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики [4] была составлена с помощью метода комплексного подхода. Она опиралась на три пакета специальных карт: сеймотектонический, геофизический и сейсмостатистический. Первый пакет характеризовал в целом сеймотектонику региона, геофизические исследования на основании интерпретации геофизических полей и сейсмотомографических данных по скоростному разрезу земной коры позволили уточнить и конкретизировать сеймотектонические данные. Сейсмостатистический пакет карт давал характеристику сейсмическому режиму изученной территории, что вместе с перечисленными исследованиями позволило построить уточнённую карту сейсмогенерирующих зон, дифференцированных по максимальной магнитуде ожидаемых землетрясений. Эта карта явилась скелетной основой карты сейсмического районирования. На последней были выделены зоны различной сотрясаемости с оценкой ожидаемой повторяемости сильных землетрясений.

Таким образом, при составлении указанной карты сейсмического районирования был реализован принцип двухстадийности, базирующийся на создании двух взаимосвязанных прогнозных моделей – модели очаговых зон и модели сейсмического эффекта.

Однако используемая в настоящее время оценка сейсмической опасности различных территорий, основанная на практически субъективном методе оценки величины колебаний земной поверхности в трёх градациях - 7, 8 и 9 баллов по шкале MSK-64, не отвечает растущим потребностям сейсмостойкого проектирования зданий и сооружений, поскольку нет чёткой зависимости между баллами интенсивности и значениями ускорений колебаний грунта, используемых при расчётах. В.И.Уломов [5] считает, что такие карты не дают адекватных оценок сейсмической опасности. Изолинии, якобы отражающие повторяемость сейсмических сотрясений один раз в 100, 1000 и 10 000 лет явились одной из причин низкой надёжности карт, построенных с использованием вышеуказанной методики. Опыт оценки сейсмической опасности в различных сейсмически активных регионах показал, что вероятностные подходы обладают рядом допущений, которые сделали такой подход весьма уязвимым к ошибкам различного рода [6].

Поэтому в последнее время в мировой практике появились новые подходы, сочетающие в себе и детерминистский, и вероятностный подходы, которые позволяют с большей детальностью и точностью оценивать сейсмическую опасность.

1.1. Детерминистская оценка сейсмической опасности.

Как указывалось ранее, составленные карты сейсмического районирования территорий Республик Центральной Азии (в частности, Кыргызстана и Казахстана) основывались на идее комплексного подхода к районированию, с учётом геологических, геофизических и сейсмологических данных. Дальнейшее развитие этой методики получило при составлении карт сейсмического районирования ряда районов Кыргызской Республики [2,4] и Республики Казахстан [7,8].

А.Б. Садыкова [9] предложила детерминистский научно-экспериментальный вариант карты сейсмического районирования Казахстана (включая территорию Северного Тянь-Шаня), который был составлен путём совместного анализа следующих материалов: карты сейсмического районирования территории Казахстана 2006 г.; карты зон возникновения очагов землетрясений; карты максимальных наблюдаемых сотрясений; зависимостей между интенсивностью сотрясений и магнитудой, глубиной очага, эпицентральной дистанцией (рисунок 1).

Основной нагрузкой её являются изолинии, разделяющие зоны максимальной интенсивности сотрясений от 5 до 9 баллов. На карту нанесены очаги известных крупных ($M=7.0$ и более) землетрясений. Возле очагов землетрясений указан год их возникновения и магнитуда.

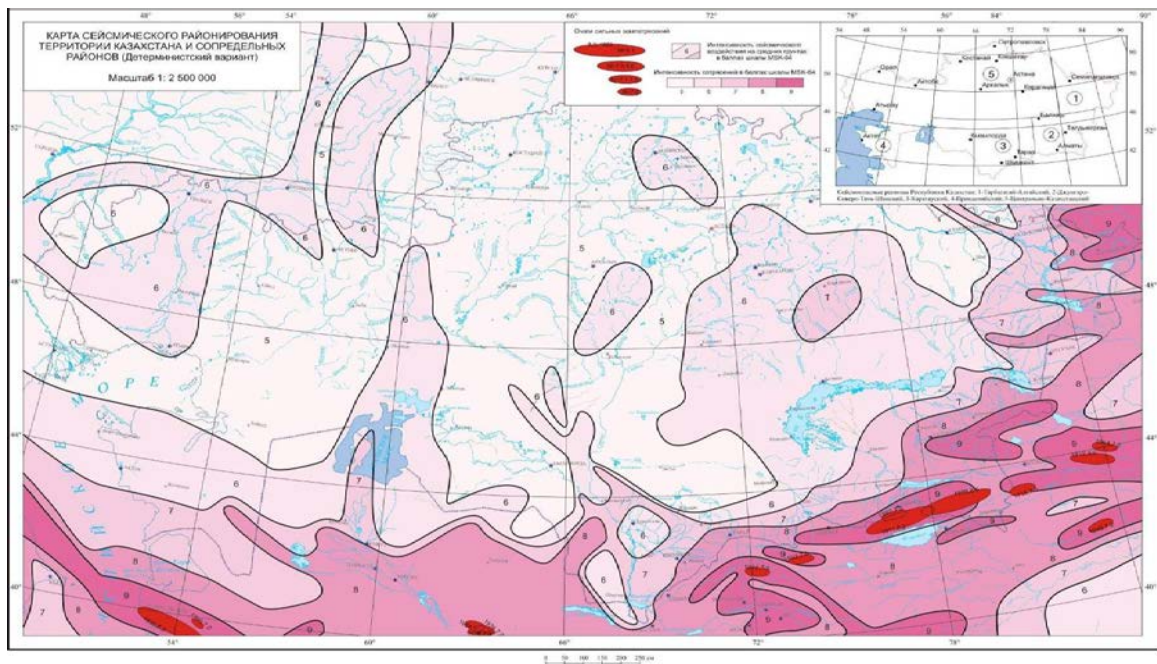


Рис. 1. Карта сейсмического районирования территории Казахстана и сопредельных территорий [9].

Традиционный детерминистский вариант карты сейсмического районирования Кыргызской Республики 2011 года (рисунок 2) составлен на основе новой карты сейсмогенерирующих зон (зон ВОЗ). При построении карты зон ВОЗ применялся комплексный подход с использованием сеймотектонической, геофизической и сеймостатистической информации [4]. Достоверность этой карты была подтверждена всеми последующими землетрясениями, которые произошли после опубликования карты - в пределах выделенных зон они не превышали заданной максимально-возможной

магнитуды. Для уточнения максимальных магнитуд зон ВОЗ использовалась карта максимальных наблюдаемых сотрясений. Эта карта представляет собой огибающие изосейсты известных сильных землетрясений, произошедших на данной территории [10]. Отметим, что для карты зон ВОЗ в качестве величины землетрясения использовалась магнитуда M_LH , определяемая по горизонтальной составляющей поверхностной волны. За последние годы в результате полевых исследований и дешифровки аэрокосмических материалов появились новые данные о палеосейсмодислокациях [11,12,13]. Сеймотектонический анализ новых данных позволил переоценить возможную сейсмическую опасность не только структур, уже испытавших оживление, но и тех, активизация которых вероятна при данной тенденции развития неотектонических процессов. Все это позволило уточнить конфигурацию части зон ВОЗ и выделить новые с высокими значениями возможной величины землетрясений (рисунок 4). К примеру, в Сонкуль-Нарынской зоне появились участки с возможными магнитудами до 7.5.

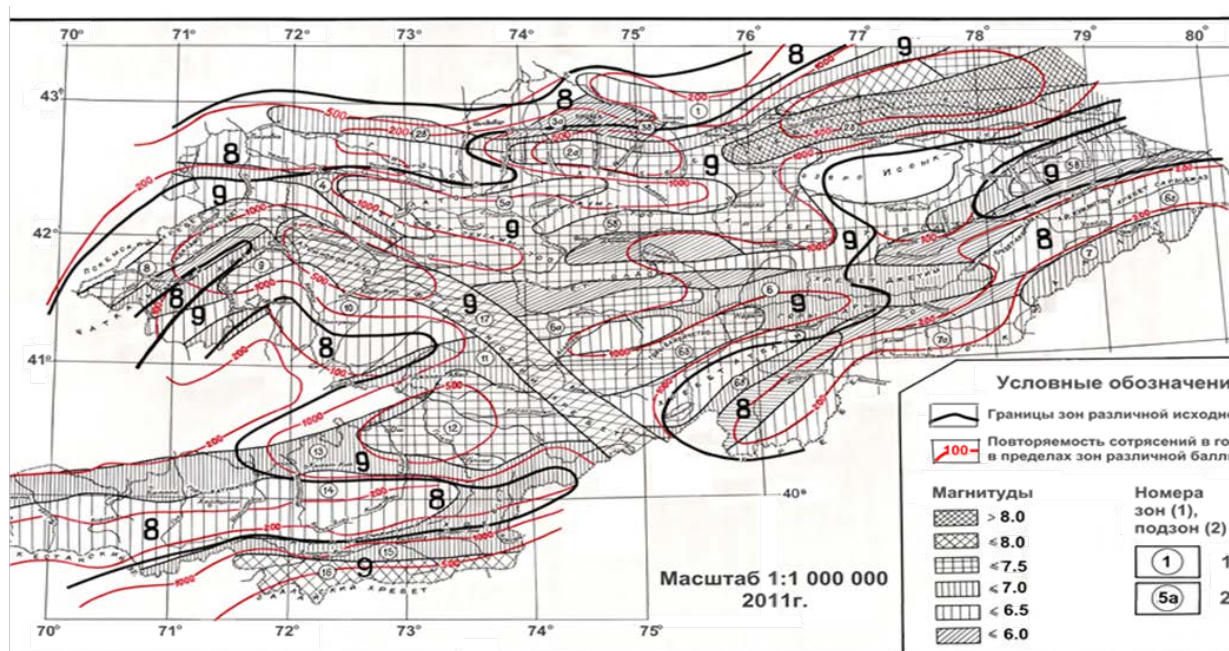


Рис. 2. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики. Составители: Абдрахматов К.Е., Джанузаков К.Д., Фролова А.Г., Погребной В.Н., 2011 г.

Для перехода от зон ВОЗ с максимально-возможными магнитудами землетрясений к районам с определённой балльностью были использованы уточнённые данные о затухании интенсивности сотрясений на поверхности Земли в зависимости от простираения геологических структур. При обработке и анализе макросейсмических данных были выявлены закономерности затухания интенсивности сотрясений от землетрясений на рассматриваемой территории. Для сильнейших землетрясений на территории Северного и Южного Тянь-Шаня характерна большая область распространения и более низкие значения коэффициента затухания балльности, чем для Центрального Тянь-Шаня. Изоэписты сейсмических событий, как правило, приближаются к форме равновеликих эллипсов, ориентированных длинной осью по простираению основных геологических структур. Обнаружена зависимость коэффициентов затухания от магнитуды землетрясений. Такие сильнейшие землетрясения, как Верненское, Чиликское, Кеминское, Жаланаш-Тюпское, Чаткальское (с $M = 6.5-8.5$) характеризуются более высоким значением эффективного коэффициента затухания, чем землетрясения с магнитудой $M = 4.5-6$. Наблюдается некоторое уменьшение коэффициента затухания и с

глубиной. Степень влияния каждого из перечисленных выше факторов учтена при оконтуривании областей различной интенсивности сотрясений.

Кроме зон ВОЗ с указанием максимальных магнитуд и изолиний интенсивности на новой карте сейсмического районирования территории Кыргызстана приведены периоды повторяемости сотрясений. В основу оценки периодов повторяемости сотрясений различной балльности положена методика расчёта сейсмической сотрясаемости, разработанная в ранних и уточнённая в более поздних работах Ю.В. Ризниченко [14]. Расчёт сотрясаемости проведён в пределах 8- и 9 –балльных зон районированной территории.

1.2 Вероятностная оценка сейсмической опасности.

При вероятностном подходе определяется расчётная интенсивность со средней повторяемостью в данной точке [15,16,17,18,19,20].

Применительно к территории Северного Тянь-Шаня он реализован в работах [21,22]. Часто эту проблему называют сейсмическим риском, понимая под этим оценку вероятности того, что в данном месте за фиксированный промежуток времени случится хотя бы одно землетрясение с уровнем воздействия не меньше заданного. При этом уровень воздействия может выражаться как в макросейсмических оценках, так и в значениях параметров сейсмических колебаний.

Садыкова А.Б. [9], внося в указанную методику существенные изменения, составила вариант вероятностного сейсмического районирования территории юга и юго-востока Казахстана, по которому было построено 3 карты. Одна из них, в качестве примера приведена на рисунке 3. Основной их нагрузкой является расчётная интенсивность I_T со средней повторяемостью в данной точке 1 раз в $T=500$, 1000 и 5000 лет. Это соответствует вероятности непревышения интенсивности I_T в течение $t=50$ лет $P=0,90$ (при $T=500$ лет), $P=0,95$ (при $T=1000$ лет) и $P=0,99$ (при $T=5000$ лет).

Как видно из приведённых карт, с увеличением вероятности P непревышения заданной интенсивности, значения максимальной интенсивности сотрясений увеличиваются. Так, в пределах наиболее сейсмоопасных зон, таких как Таласо-Ферганская, Северо-Тянь-Шаньская и Джунгаро-Борохоринская, значение I_{max} увеличиваются от 8.5-9.0 при вероятности непревышения $P=0.95$ до 9.0-9.5 при $P=0.99$.

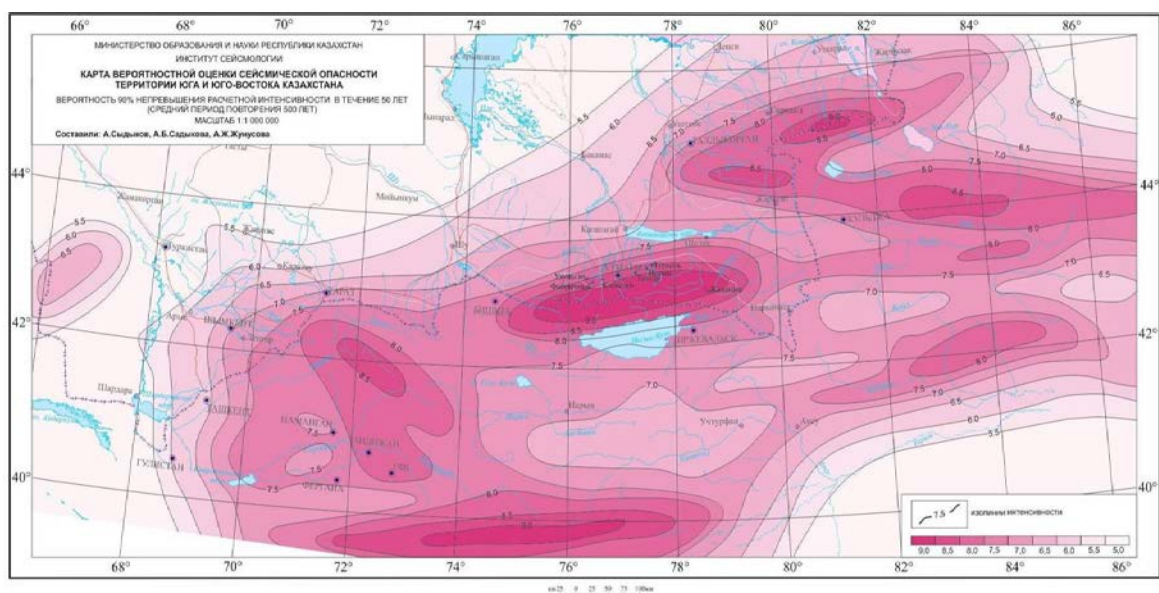


Рис.3. Карта вероятностной оценки сейсмической опасности территории юга и юго-востока Казахстана и прилегающих территорий. Вероятность 90% непревышения

расчётной интенсивности в течение 50 лет (средний период повторяемости один раз в 500 лет) [9].

В рамках глобальной программы сейсмической опасности [23,24,25] наряду с другими регионами рассматривалась и сейсмическая опасность Центральной Азии (рисунок 4). Авторы программы пришли к выводу, что большая часть территории Кыргызстана имеет очень высокий уровень риска: пиковые ускорения колебаний грунта (PGA) могут превысить 0.48 м/сек^2 при периоде повторяемости 475 лет.

Приведённые в этих работах вероятностные карты сейсмической опасности были рассчитаны для больших территорий и сглаживают уровень PGA для этой относительно маленькой страны (площадью меньше чем 200000 км^2).

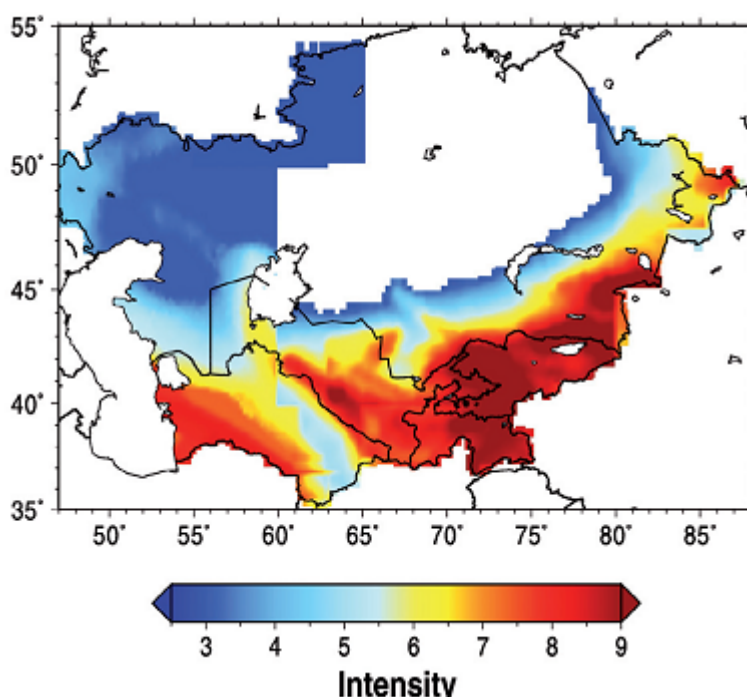


Рис.4. Карта PSHA для территории Центральной Азии в терминах макросейсмической интенсивности с 10% вероятностью превышения в течение 50 лет, составленная в рамках проекта GSHAP[23].

Абдрахматов К.Е. с соавторами [26] составили карту вероятностной оценки сейсмической опасности территории Кыргызской Республики (рисунок 5), применив новый подход, который состоял в вычисления вероятностных карт интенсивности Ариеса [27,28]. Сама процедура вычислений та же самая, что и для пиковых ускорений грунта, но законы затухания различны. Авторы применили, в основном, эмпирические законы [27,29], но попробовали также определить теоретические соотношения на основе акселерограмм, моделируемых для различных величин и эпицентральных расстояний, используя стохастический метод [30]. Кроме того, для вероятностных оценок PGA и интенсивности использовалось стохастическое моделирование акселерограмм. Для учёта неопределённостей, влияющих на соотношение Гутенберга-Рихтера использован верхний 90 % лог-линейной доверительный интервал.

Указанные исследователи [26] считают, что наиболее приемлемым для территории Кыргызстана является закона затухания Пенга и других [31]. Этот закон выведен для похожих тектонических условий и согласуется с экспериментальными данными, полученными по записям сильных движений сетью киргизских и казахских станций.

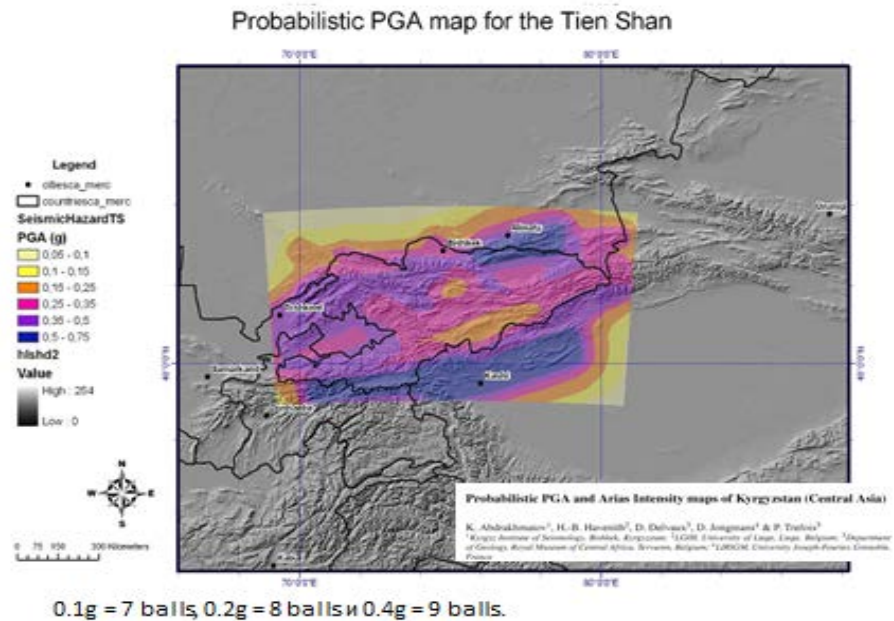


Рис.5. Карта вероятностной оценки сейсмической опасности территории Кыргызской Республики. Вероятность 90% не превышения расчётной интенсивности в течение 50 лет (средний период повторяемости один раз в 500 лет) [26].

Вероятностные карты пиковых ускорений грунта и карты интенсивности Ариаса показывают, что самая высокая сейсмическая опасность возможна для территории Южного Тянь-Шаня, горного обрамления Ферганской долины, для Чаткальского, Угамского и Суусамырском хребтов, также для Кемино-Чиликской области. Наибольшему риску из больших городов подвергаются г. Кашгар и г. Алматы - с максимальными значениями ускорений 0.66 g и 0.47 g, соответственно с 90 %-вероятностями не превышения за время ожидания 50 лет.

При исследованиях [32], проведённых в рамках проекта ЕМСА (модель землетрясений Центральной Азии) при вероятностной оценке сейсмической опасности для Центральной Азии (рисунок 6) использованы модель площадного сейсмического источника и разные подходы Корнелия [16]. Сейсмическая опасность оценивалась только с учётом мелкофокусных землетрясений (глубина < 50 км) и использовался обновлённый (по сравнению с предыдущими проектами) каталог землетрясений для региона. Сейсмическая опасность рассчитывалась в терминах макросейсмической интенсивности (МСК-64). Карта сейсмической опасности, рассчитанная для 10% вероятности превышения за 50 лет, получена при помощи компьютерной программы OpenQuake [33], которая является открытым программным средством, разработанным в рамках проекта GEM (Global Earthquake Model).

Указанные исследователи считают, что наибольшая опасность, наблюдаемая в регионе, достигает интенсивности около 8 баллов в Южном Тянь-Шане для периода повторяемости равного 475 лет. Наибольшая опасность, полученная с использованием различных подходов для некоторых городов региона (Бишкек, Душанбе, Ташкент и Алматы), составляет 7.0, между 7 и 8, и 8.0 баллов макросейсмической интенсивности, для периода повторяемости равного 475 лет (рисунок 6).

В [32] отмечены некоторые районы, обладающие наивысшей сейсмической опасностью. Это Алайская впадина, Ферганская впадина и районы, расположенные к северу от Иссык-Куля. Они характеризуются интенсивностью выше 8 в площадной модели. Максимальная опасность, наблюдаемая в регионе, составляет 9 баллов в Южном Тянь-Шане для периода повторяемости в 475 лет.

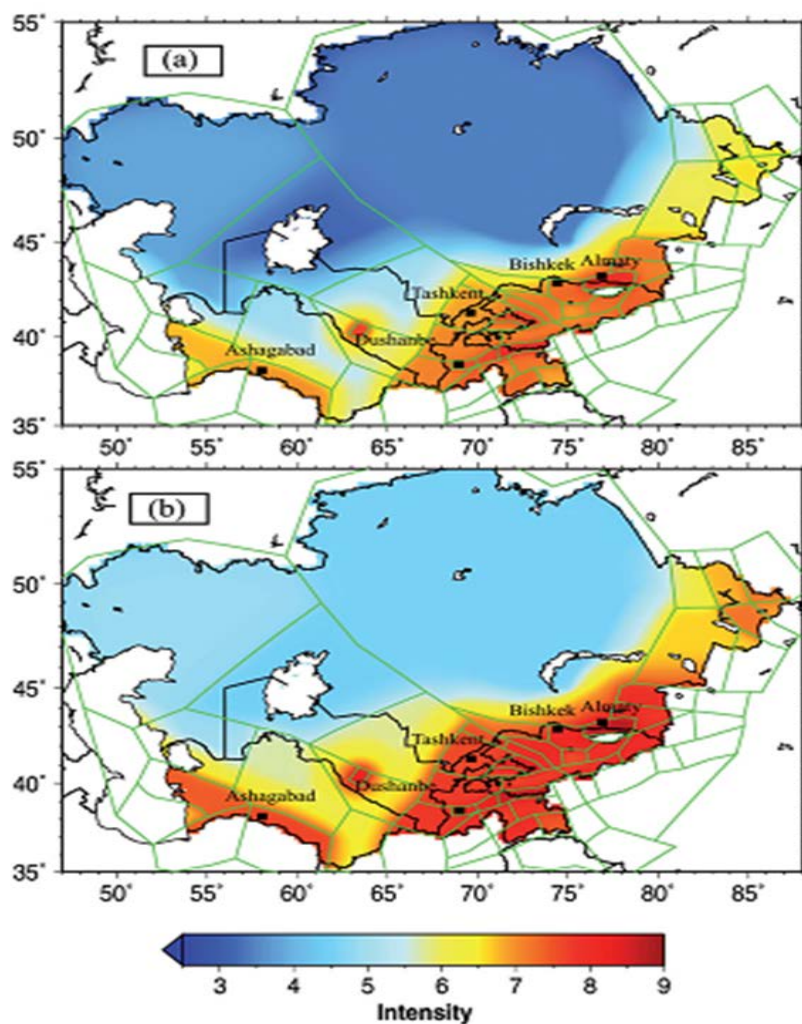


Рис.6. Вероятностная карта сейсмической опасности в терминах интенсивности с (а) 10% вероятностью и (b) 2% вероятностью превышения в течение 50 лет, полученная с использованием площадной модели источника. Зелёными линиями оконтурены выделенные площади [32].

Сравнение исследований, проведённых в рамках различных проектов, по оценке сейсмической опасности территории Центральной Азии показывает, что результаты имеют явные различия в терминах абсолютного уровня сейсмической опасности, хотя при этом расположение районов с наивысшей опасностью совпадают. Очевидно, что различия, главным образом, связаны с разным сейсотектоническим районированием.

Литература

1. Review of recommendation for probabilistic seismic hazard analysis.//Guidance on uncertainty and use of experts. National Academy press, Washington DC, 1997, pp.100-104.
2. Опыт комплексного сейсмического районирования на примере Чуйской впадины. Фрунзе: Илим, 1975, с. 120.
3. Геологические основы сейсмического районирования Иссык-Кульской впадины. // Фрунзе, Илим, 1978.
4. 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.
5. Уломов В.И. Об основных положениях и технических рекомендациях по созданию новой карты сейсмической районирования территории Российской Федерации. //Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. - М.: ОИФЗ РАН, 1995. –Вып .2-3, с.9-26.
6. Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) ошибочны. Вопросы инженерной сейсмологии, 2011, т.38, №1, стр. 65-76.
7. Курскеев А.К., Тимуш А.В., Шацлов В.В., Сыдыков А., Горбунов П.Н., Сыдыкова А.Б. //Сейсмическое районирование Республики Казахстан. //Алматы: Эверо, 2000. –с. 219.
8. Нусипов Е., Рахымбаев М.М., Узбеков Н.Б., Тимуш А.В., Шацлов В.И., Сыдыков А., Казаков В.В., Сыдыкова А.Б. //Сейсмическое районирование территории Актюбинской области. Алматы, 2006, с.99.
9. Садыкова А.Б. Сейсмическая опасность территории Казахстана, Алматы, 2012, с. 267.
10. Ризниченко Ю.В. Карты вероятной интенсивности землетрясений. // Доклады АН СССР. 1973. -Т.210, №1. С.82-84.
11. Чедия О.К., Абдрахматов К.Е., Лемзин И. Н., Корженков А.М. Сейсмогравитационные структуры Кыргызстана. // Геология кайнозоя и сеймотектоника Тянь-Шаня: Сб. - Бишкек: Илим, 1994. - С. 85-97.
12. Абдрахматов К.Е. Тектонические движения позднего плейстоцена и голоцена территории Кыргызской Республики. Автореф. дис....доктора геол. - мин. наук, Бишкек, Илим, 1995, с. 35.
13. Гапич В.А., Тимуш А.В., Чабдаров Н.М. Сейсмодислокации Южного Казахстана. Ала-Ата, Институт сейсмологии АН КАЗ ССР, 1989, с.52. Деп. ВИНТИ 12.04.89, №2420-В89.
14. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. – М.: Наука, 1985. С. 406.
15. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis.// Seismol. Soc. America Bull., 1968, vol.58,-№5, P.
16. Cornell C.A. Probabilistic analysis of damage to structure under seismic loads.-In: Dynamic Waves in Civil Engineering. London, 1971.
17. Merz H.A. and Cornell C.A. Seismic risk analysis based on a quadratic magnitude-frequency law. // Seismol. Soc. America Bull., 1973.-Vol. 63, №6, P.1999-2006.
18. Кейлис-Борок В.И., Кронрод Т.Д., Молчан Г.М. Расчёт сейсмического риска.// Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. С.69-82.
19. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования.// Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. - М.: ОИФЗ РАН, 1995. –вып.2-3.-С.9-26.
20. Explanation of Tien Shan seismic intensity zoning map (scale 1:2000000).1996, p. 15.

21. Аптикаев Ф.Ф., Нурмагамбетов А., Сыдыков А. и др. Прогноз сейсмических воздействий для целей детального сейсмического районирования (на примере г. Алматы). // Колебания грунта и сейсмический эффект при землетрясениях. М.: Наука, 1982.-С.30-97. Вопросы инж.сейсмологии; Вып.23.
22. Михайлова Н.Н. Сейсмическая опасность в количественных параметрах сильных движений грунта (на примере г. Алмата): автореф. ...докт. физ. - мат. наук. М.,1996, с.48.
23. Giardini D., Grunthal G., Shedlok K., Zhang P. The GSHAP Global Seismic Hazard Map. // Annali Di Geofisica, December 1999/ -Vol.42,-№6. P.1225-1228.
24. Ulomov V.I. The GSHAP Region 7 working group, 1999, Seismic hazard of Northern Eurasia, Annali di Geofisica 42(6), 1023-1038.
25. Zhang P., Yang Z., Gupta H.K., Bhatia S.C. and Shedlock K.M., 1999. Global seismic hazard assessment program (GSHAP) in continental Asia. Annali di Geofisica 42(6), 1167-1190.
26. Abdrakhmatov K.Ye., Havenith H.B., Delvaux D., Jongmans D., Trefois P. Probabilistic PGA and Arias intensity maps of Kyrgyzstan (Central Asia). J. Seismol., 2003, #7, pp.203–220.
27. Wilson R.C. and Keefer D.K. Predicting the areal limits of earthquake-induced landsliding. In: Ziony, J.I. (ed.), Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region – An Earth Science Perspective, 1985, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 1360, pp. 316-345.
28. Arias A. A measure of earthquake intensity.// In: Hansen, R.J. (ed.). Seismic Design for Nuclear Powerplants, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970, pp. 438-483.
29. Keefer D.K. and Wilson R.C. Predicting earthquake induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments. //In: Sadler, P.M. and Morton, D.M. (eds.). Landslides in a Semi-Arid Environment, Inland Geological Society, 1989, #2, pp. 118-149.
30. Boore D.M. SMSIM-Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: version 1.0, U.S. Geol. Surv. 1996, Open-File Rept. 96-80-A, p.73.
31. Peng K.Z., Wu F.T. and Song L. Attenuation characteristics of peak horizontal acceleration in Northeast and Southwest China, 1985. EESD 13, pp.337-350.
32. S. Ullah1, D. Bindi, M. Pilz, L. Danciu, G. Weatherill, E. Zuccolo, A. Ischuk, N. Mikhailova, K. Abdrakhmatov, S. Parolai. Probabilistic seismic hazard assessment for Central Asia, ANNALS OF GEOPHYSICS, 58, 1, 2015, S0103; doi:10.4401/ag-6687.
33. Paganì M., D. Monelli G., Weatherill L. Danciu, H. Crowley, V. Silva, P. Henshaw, L. Butler, M. Nastasi, L. Panzeri, M. Simionato and D. Viganò (2014). OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model, Seismol. Res. Lett., 85 (3), pp. 692-702.

Рецензент: к. г.-м. н. Омуралиев М.О.