

**МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ
СОТРЯСЕНИЙ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ КЫРГЫЗСТАНА
ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ**

В.В. Гребенникова¹, Е.Л. Миркин²

¹Институт сейсмологии НАН КР Кыргызской Республики, г. Бишкек, grvalentina@mail.ru

²Международный Университет Кыргызстана, г. Бишкек

Начиная с 2015 г. в Институте сейсмологии НАН КР проводятся работы по оперативному определению теоретической интенсивности проявлений сильных и ощутимых землетрясений, происходящих на территории Кыргызстана и прилегающих районов соседних государств (Казахстана, Узбекистана, Таджикистана, Китая). Для этих целей была создана База данных населенных пунктов Кыргызстана и соседних государств, которая содержит сведения о 1893 пунктах. Кроме этого создана БД сильных и ощутимых землетрясений, произошедших на территории региона до 2016 г. и содержащая как основные параметры землетрясений, так и сведения об интенсивности ощутимых событий. Управление созданным программным комплексом осуществляется программой «Seismic Intensity», итогом работы которой являются таблицы расчетных интенсивностей сотрясений в населенных пунктах Кыргызстана и карты теоретических изосейст.

Ниже представлена процедура обработки землетрясений и методика расчета интенсивности.

Методика обработки сильных и ощутимых землетрясений в службе срочных донесений (ССД) Центра обработки данных (ЦД) ИС НАН КР предусматривает обработку цифровых записей, поступающих с сейсмических станций сетей KNET и KNET [1] в режиме реального времени в случае сильного и ощутимого землетрясения, произошедшего в пределах координат $\varphi=39.00^{\circ}-44.00^{\circ}N$ и $\lambda=69.00^{\circ}-81.00^{\circ}E$. На рис. 1 показано расположение сейсмических станций сетей KNET и KNET [1].

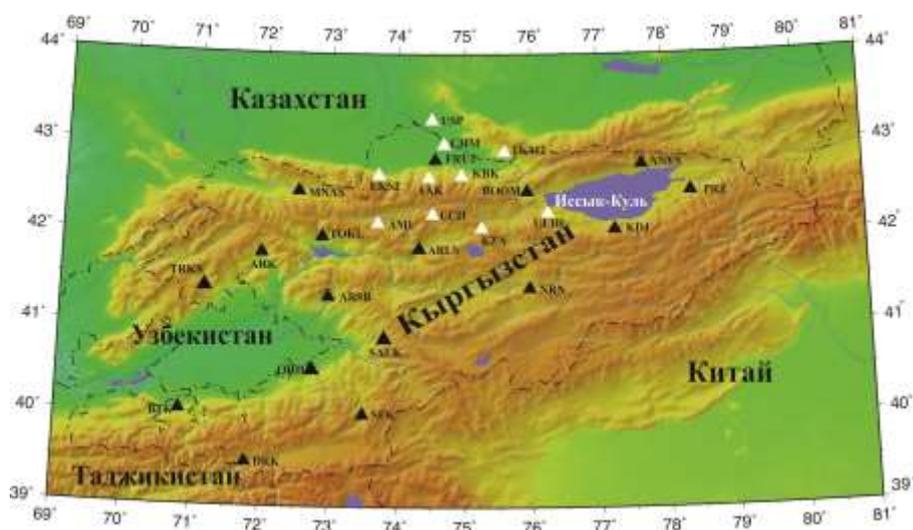


Рис. 1. Схема расположений станций сетей KNET (белые треугольники) и KNET (черные треугольники)

По действующему регламенту в течение 30 минут сотрудники ССД ЦД ИС НАН КР должны определить основные параметры произошедшего землетрясения: координаты эпицентра ($\varphi^{\circ}N$, $\lambda^{\circ}E$), магнитуду ($MPVA$), глубину очага (h , км) и интенсивность сейсмических сотрясений (I_i) в населенных пунктах (НП) на территории Кыргызской Республики в баллах шкалы MSK-64

[2]. Результаты оперативной обработки ощутимых землетрясений используются для информирования администрации ИС, директивных органов Республики.

Вся информация размещается на официальном интернет-сайте Института сейсмологии НАН КР (<http://www.seismo.kg>), который находится в открытом доступе для работников СМИ и общественности. Кроме того, эта информация передается в Международный Сейсмологический Центр ISC (г. Тэтчем, Великобритания, www.isc.ac.uk) и Геофизическую Службу Российской Академии наук (ГС РАН, г. Обнинск, Россия, <http://www.ceme.gsras.ru>).

Данная работа ведется регулярно, в круглосуточном режиме дежурными сотрудниками ЦД ИС НАН КР.

С 2015 г. в целях автоматизации процесса обработки сейсмических данных, поступающих в режиме реального времени со станций сетей KNET и KRNET в ЦД, была внедрена программа «SeisComp3» [3, 4]. Программа позволяет в течение трех минут после основного толчка провести автоматическое определение основных параметров (φ° , λ° , h , $MPVA$) ощутимых сейсмических событий, произошедших в определенном диапазоне координат, с достаточно хорошей точностью.

Наиболее сложным и долгим по времени является процесс определения I_i . До 2015 г. оценка I_i в НП проводилась вручную с помощью палеток (моделей), построенных с использованием региональных значений коэффициентов затухания ν и c по Джанузакову К.Д. [5] в известном уравнении макросейсмического поля Шебалина Н.В. [6]:

$$I_i = bM - \nu \lg \sqrt{r^2 + h^2} + c, \quad (1)$$

где I_i – интенсивность сотрясения в баллах, вызванная землетрясением с магнитудой MLH , с очагом на глубине h (км) и на расстоянии r (км) от точки наблюдения.

Коэффициенты: $b=1.5$;

$\nu=3.8$, $c=3.6$, если берется средний радиус;

$\nu=3.4$, $c=3.3$ – вдоль тектонических структур;

$\nu=4.4$, $c=4.2$ – вкrest структур.

В целях автоматизации процесса определения теоретической интенсивности I_i в населенных пунктах Кыргызстана и сокращения срока оповещения МЧС КР были разработаны База Данных (БД) «SEISMIC INTENSITY» и Программа «SEISMIC INTENSITY» [7, 8]. В мае 2015 г. на Ученом совете ИС НАН КР данная разработка была доложена и рекомендована к внедрению в ССД ЦД ИС НАН КР (Протокол № 2 Ученого совета от 28 мая 2015 г.: Акт о внедрении от 3 июня 2015 г.).

Технические характеристики разработки БД "SEISMIC INTENSITY" [7] – тип ЭВМ: IBM PC и совместимые ПК; операционная система: Windows XP, 7–10; язык программирования: MATLAB; объем – 15370 Кбайт.

БД содержит информацию об основных параметрах 219 исторических и современных землетрясений по 2016 г. с $M \geq 4.6$ и макросейсмические данные 77 ощутимых землетрясений, произошедших в пределах координат $\varphi=39.00^\circ-43.20^\circ N$ и $\lambda=69.00^\circ-80.30^\circ E$ [9–1]. Все 296 землетрясений по локации координат их эпицентров разделены на 36 групп (табл. 1, рис. 2). Имеющиеся в каждой группе данные о макросейсмических проявлениях ощутимых землетрясениях являются источником для построения модели макросейсмического поля в данной плейстоценовой области.

Таблица 1. Пример состава группы модельных землетрясений (№ 12)

№	Дата, дн мес год	t_0 , ч мин с	φ° , N	λ° , E	h , км	M	K_p	Название землетрясения	I_0
1	01.26.1940	23 11 41.0	41.90	77.20	15	5.5	14.0	Барскаунское-I	
2	18.10.1965	10 21 44.6	41.97	77.55	15	5.0	13.0	Барскаунское-II	6–7
3	06.04.1979	18 30 04.8	41.97	77.43	25	5.0	13.5	Барскаунское-III	6
4	05.07.1980	20 25 23.9	41.92	77.50	20	5.6	13.8	Каджисайское-I	6–7
5	21.12.1983	19 30 59.5	42.07	77.45	15	4.6	12.5	Каджисайское-II	6
6	14.11.2014	07 24 16.6	42.12	77.22	19	5.5	13.9	Каджисайское-III	7

Примечание. Жирным шрифтом отмечены землетрясения, имеющие макросейсмические данные, которые являются моделями в данной группе [7].

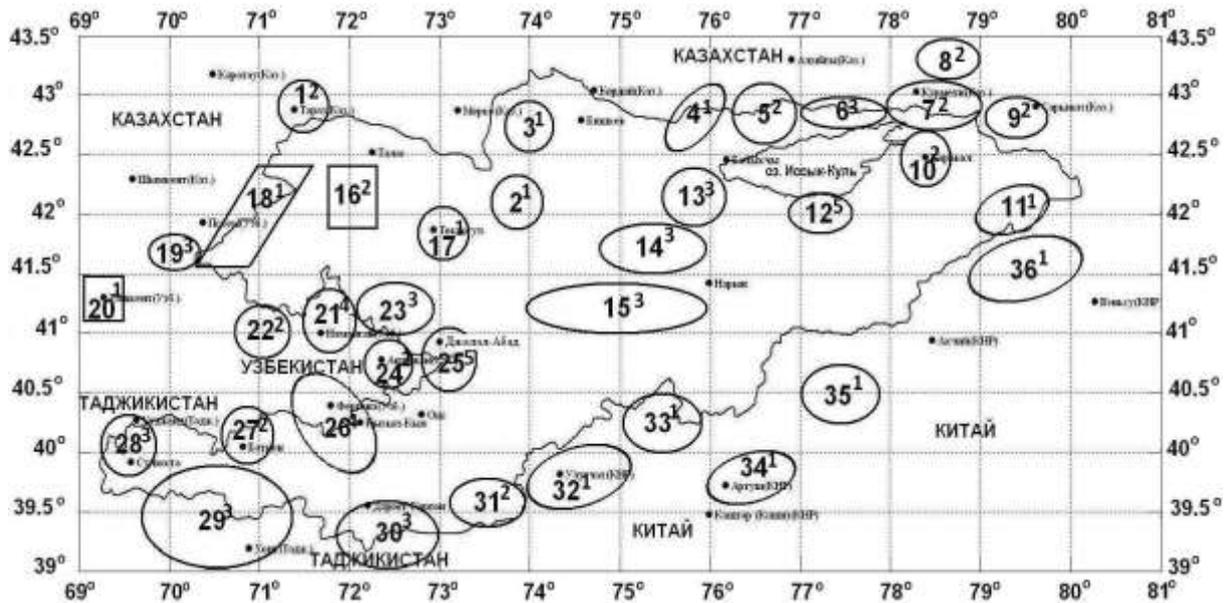


Рис. 2. Схема территориального расположения плейстосейстовых областей 36 групп землетрясений каталогов [9–11] с $M \geq 4.6$, произошедших в пределах координат $\varphi=39.00^{\circ}-43.20^{\circ}N$ и $\lambda=69.00^{\circ}-80.30^{\circ}E$ (цифрами обозначен номер группы, верхний индекс – число землетрясений с макросейсмическими данными в группе)

Помимо сведений о сильных и ощутимых землетрясениях, в БД «SEISMIC INTENSITY» имеются сведения (кадастры) о населенных пунктах Кыргызской Республики, а также соседних государств – Казахстана, Узбекистана, Таджикистана, Китая. Кадастры составлены на кыргызском и русском языках по данным Государственного классификатора «Система обозначений объектов административно-территориальных и территориальных единиц Кыргызской Республики» (ГК СОАТЕ) от 21.02.2013 г. № 8 (с дополнениями и поправками по март 2016 г.). Географические координаты НП КР предоставлены Государственной картографо-геодезической службой КР «Госкартография» (табл. 2).

Таблица 2. Фрагмент кадастра населенных пунктов Кыргызстана

Населенный пункт	Область	Район	Сельский район	φ°, N	λ°, E
г. Нарын	Нарынская	Нарынский		41.42	75.99
Восьмого Марта	Нарынская	Нарынский	Ак-Кудукский	41.46	75.4
Ак-Кудук	Нарынская	Нарынский	Ак-Кудукский	41.48	75.33
Шоро	Нарынская	Нарынский	Ак-Кудукский	41.44	75.43
Дёбёлюу	Нарынская	Нарынский	Дёбёлинский	41.44	76.23
Алыш	Нарынская	Нарынский	Дёбёлинский	41.43	76.19
Кенеш	Нарынская	Нарынский	Дёбёлинский	41.43	76.13
Джан-Булак	Нарынская	Нарынский	Джан-Булакский	41.43	75.73
Джергетал	Нарынская	Нарынский	Джергеталский	41.57	75.78
Джалгыз-Терек	Нарынская	Нарынский	Джергеталский	41.46	75.78

Расчеты I_k в НП осуществляются Программой "SEISMIC INTENSITY" [8].

Программа "SEISMIC INTENSITY" – тип ЭВМ: IBM PC – совместимые ПК; операционная система: Windows XP, 7–10; язык программирования: MATLAB; объем – 388 Кбайт.

В случае возникновения сильного землетрясения дежурный сотрудник ССД ЦД ИС НАН КР вводит в программу основные параметры землетрясения (φ° , λ° , $MPVA$, h). В целях уточнения интенсивности сотрясений в определенном районе или области Кыргызстана для служб быстрого реагирования МЧС КР оператор может дать ограничение на минимальную теоретическую интенсивность.

Модельная интенсивность сейсмических сотрясений $I_{кМ}$ от землетрясений для каждой группы землетрясений БД "SEISMIC INTENSITY" рассчитывается по формуле Н.В. Шебалина [6]:

$$I_{кМ} = bM - v \lg \sqrt{r_k^2 + h^2} + c, \quad (2)$$

где M – магнитуда, h – глубина очага (км), r_k – расстояние от эпицентра (км) до населенного пункта (объекта), определяемое по формуле:

$$r_k = \sqrt{((X_0 - X_k) * 83)^2 + ((Y_0 - Y_k) * 111)^2}, \quad (3),$$

X_k, Y_k – географические координаты населенного пункта (долгота и широта соответственно), v, c – постоянные параметры, подлежащие определению, $k=1, 2, \dots, n$.

Ставится задача подбора параметров v и c так, чтобы модель наилучшим образом соответствовала экспериментальным данным, имеющимся в той группе землетрясений, куда по координатам эпицентра попадает новое событие. Критерий близости модельных и экспериментальных данных определим как сумму квадратов невязок (ошибок) между экспериментальным замером и значением, полученным по формуле (2). Критерий метода наименьших квадратов для этого случая имеет вид:

$$\min_{v, c} \left[J = \sum_{k=1}^n (I_k - I_{кМ})^2 \right], \quad (4)$$

где I_k – полученная экспериментально интенсивность в конкретной географической точке; $I_{кМ}$ – полученная по модели (2) величина, определяющая интенсивность в конкретной географической точке.

$$I_k = 1.5 * M + \alpha^T \phi_k, \quad (5)$$

где $\alpha = [v \ c]$ – вектор неизвестных коэффициентов, $\phi_k = [-\lg \sqrt{r_k^2 + h^2} \ 1]^T$ – регрессионный измеряемый вектор. Тогда с учетом (5) критерий (4) примет вид:

$$\min_{\alpha} \left[J = \sum_{k=1}^n (I_k - 1.5 * M - \alpha^T \phi_k)^2 \right]. \quad (6)$$

Решение задачи методом наименьших квадратов (МНК) определим из необходимого условия минимума критерия (6) $\frac{\partial J}{\partial \alpha} = 0$, получим:

$$\alpha = \left[\sum_{k=1}^n \phi_k * \phi_k^T \right]^{-1} * \sum_{k=1}^n (I_k - 1.5) * \phi_k. \quad (7)$$

Таким образом, выражение (7) дает лучшее в смысле МНК приближение модели к экспериментальным данным.

В зависимости от введенного ограничения расчета минимальной величины сотрясений, (I_{\min}) через одну–две минуты на мониторе появляется визуализация информации в виде:

- карты–локации эпицентра землетрясения с нанесенными на нее теоретическими изосейстами;
- таблицы расчета интенсивности сейсмических сотрясений (в баллах) в населенных пунктах.

Ниже приведены некоторые результаты апробирования программного комплекса "SEISMIC INTENSITY" по автоматическому определению интенсивности сейсмических сотрясений в населенных пунктах для землетрясений, произошедших в 2011 г.

В табл. 3 приведены землетрясения региона за 2011 г., для которых проводились расчеты теоретической интенсивности. В таблицу включены только те пункты, для которых имеются наблюдаемые значения интенсивности.

Таблица 3. Значения теоретической и экспериментальной интенсивности в населенных пунктах Центральной Азии для землетрясений 2011 г.

Дата, д м	t_0 , ч мин с	Координаты эпицентра		h , км	K_p	Населенный пункт	Координаты пункта		Δ , км	I , балл	
		φ° , N	λ° , E				φ° , N	λ° , E		набл.	расч.
19.01	03 47 3.5	39.03	72.03	20	12.5	Дараут-Курган	39.55	72.2	60	3-4	3
13.02	19 12 30.7	39.62	73.75	21	12.0	Нура	39.63	73.87	10	5-6	4.9
18.03	09 36 27.1	43.00	74.92	20	11.6	Кант	42.88	74.83	15	5	5.1
09.04	12 30 24.8	42.07	74.82	16	11.6	Кызарт	41.98	74.97	16	5	4.3
						Чаек	41.92	74.52	30	4-5	3.7
02.06	21 06 41.6	42.37	78.42	25	11.6	Каракол	42.48	78.39	12	5	4.8
						Джети-Огуз	42.32	78.23	17	4-5	4.6
						Алматы	43.25	76.9	158	2-3	2
21.06	14 47 36.3	39.17	72.33	17	11.9	Дараут-Курган	39.55	72.2	44	3-4	4.2
19.07	19 35 43.9	40.12	71.45	17	14.1	Советское	40.17	71.31	13	8-9	8.2
						Алга	40.23	71.5	13	8	8.2
						Халмион	40.2	71.63	18	8	8
						Орозбеково	40.05	71.67	20	8	7.8
						Таш-Кыя	40.13	71.72	23	8	7.7
						Кыргыз-Кыштак	40.3	71.35	22	7	7.7
						Айдаркен	39.93	71.33	23	7	7.6
						Кадамжай	40.12	71.72	23	7	7.7
						Пульгон	40.13	71.73	24	7	7.6
						Чал-Таш	40.14	71.73	24	7	7.6
						Гайрат	40.02	71.74	27	7	7.5
						Кескен-Таш	40.03	71.75	27	7	7.4
						Ормош	39.93	71.25	27	7	7.4
						Сырт	39.91	71.23	30	7	7.3
						Сай	39.9	71.22	31	7	7.2
						Боз-Адыр	39.98	71.07	36	7	7
						Таян	39.9	71.1	39	7	6.9
						Марказ	40.23	71.9	40	7	6.9
						Согмент	39.88	71.03	45	7	6.7
						Газ	39.87	71.02	46	7	6.6
Джаны-Джер	40.12	70.9	47	7	6.6						
Кара-Булак	39.93	70.93	49	7	6.5						
Чон-Талаа	40.17	70.88	49	7	6.5						
Кара-Дебе	40.23	72.03	51	6-7	6.5						
Уч-Коргон	40.23	72.05	52	6-7	6.4						
Баткен	40.05	70.82	54	6-7	6.3						
Фергана	40.39	71.79	42	6	6.8						
Коканд	40.52	70.94	62	5-6	6.1						
Исфара	40.12	70.61	71	5-6	5.8						

Как видно из табл. 3, для землетрясений 2011 г., которые являются модельными для программы "SEISMIC INTENSITY", наблюдается хорошее совпадение теоретических и экспериментальных интенсивностей.

Согласно установленному регламенту для каждого ощутимого землетрясения программа "SEISMIC INTENSITY" рассчитывает теоретические изосейсты по уравнению макросейсмического поля (2) с коэффициентами v и c , полученными на основании модельных землетрясений соответствующей группы землетрясений. Ниже приведена карта теоретических изосейст Канского землетрясения 19 июля 2011 г. ($K_p=14.1$, $M_{wGCMT}=6.2$) (рис. 3).

В работе [13], которая обобщает все полученные данные по Канскому землетрясению, проведен анализ макросейсмической информации и построена карта изосейст, которая приведена ниже (рис. 4).

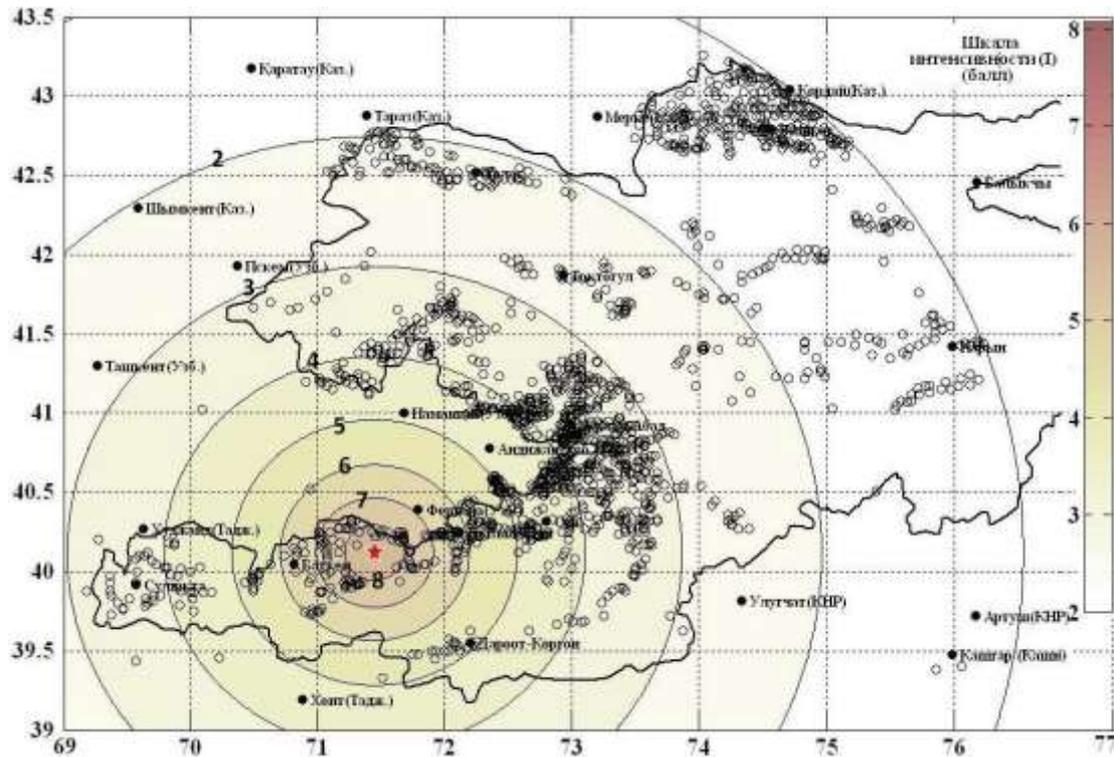


Рис. 3. Карта теоретических изосейст Канского землетрясения 19 июля 2011 г.

Расчет произведен для следующих параметров землетрясения: $M_{расч}=6.5$; $M_{WGSMТ} = 6.2$ по [12]; $K_p=14.1$; $h=17$ км; $\phi=40.12^\circ$; $\lambda=71.45$.

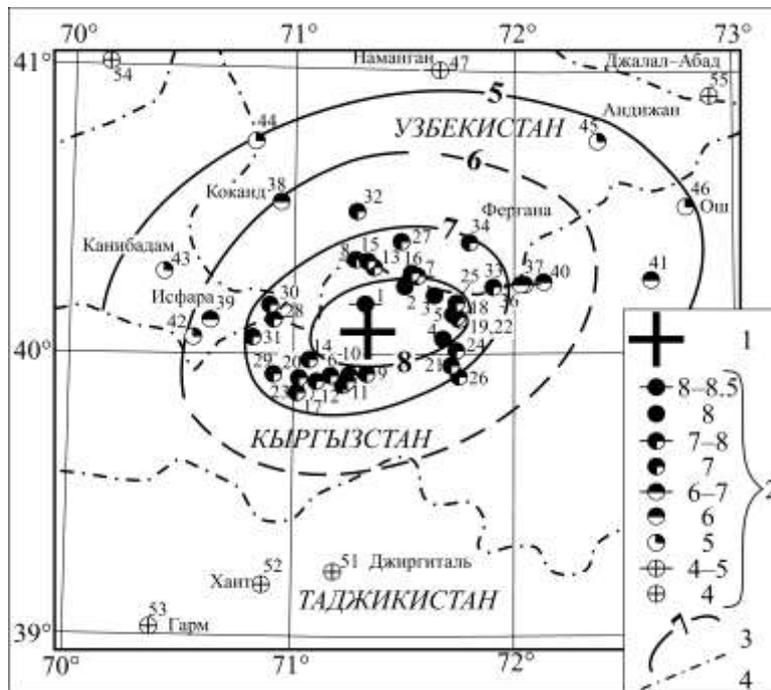


Рис. 4. Карта наблюдаемых изосейст Канского землетрясения 19 июля 2011 г. с $K_p=14.1$, $M_S=6.2$ из [13]

1 – макросейсмический эпицентр (максимальные разрушения); 2 – интенсивность сотрясений I , баллы по [2]; 3 – изосейста; 4 – государственная граница.

Сравнивая рис. 3 и 4, можно отметить, что программа "SEISMIC INTENSITY" неплохо отражает картину интенсивности сотрясений, вызванных ощутимым землетрясением с магнитудой $M=6.2$.

Заключение. В работе предложен новый метод определения интенсивности сотрясений (теоретических изосейст) в населенных пунктах Кыргызстана, полученных по математической модели Шебалина (1) [6]. Метод использует собранную авторами [7] базу макросейсмических данных сильных землетрясений, произошедших на территории Кыргызстана. Предложенный метод позволяет выбрать параметры математической модели, позволяющей наилучшим образом приблизить теоретическую изосейсту к данным, полученным в результате полевых макросейсмических наблюдений. На базе разработанного метода создан программный комплекс "SEISMIC INTENSITY", позволяющий оперативно рассчитать и получить табличную и графическую информацию (карту теоретических изосейст) по оценке интенсивности сотрясений в населенных пунктах Кыргызстана. Полученная с помощью разработанного авторами программного комплекса оперативная информация предназначена для Государственных организаций и Министерства чрезвычайных ситуаций Кыргызской Республики для планирования аварийно-спасательных работ в случае произошедшего сильного землетрясения.

Л и т е р а т у р а

1. Берёзина А.В. (отв. сост.). Сейсмические станции Института сейсмологии НАН Кыргызской Республики в 2011г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
2. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64 // Сейсмическое районирование СССР (Ред. С.В. Медведев). – М.: Наука, 1968. – С. 158–162.
3. Weber B., Becker J., Hanka W., Heinloo A., Hoffmann M., Kraft T., Pahlke D., Reinhardt J., Thoms H. SeisComp3 – automatic and interactive real time data processing // Geophysical Research Abstracts In EGU General Assembly (Vienna, Austria), 2007. – 9. – P.09219.
4. Hanka W., Saul J., Weber B., Becker J., Harjadi P., Fauzi, GITEWS Seismology Group. Real-time – earthquake monitoring for tsunami warning in the Indian Ocean and beyond // Natural Hazards and Earth System Science, 2010. – 10. – P. 2611–2622.
5. Джанузаков К.Д. Затухание интенсивности сотрясений и уравнения макросейсмического поля сильных землетрясений Тянь-Шаня // Геолого-геофизические исследования в Институте сейсмологии НАН КР. – Бишкек: 2000. – С. 35–37.
6. Шебалин Н.В. О предельной магнитуде и предельной балльности землетрясений // Физика Земли. – 1971. – № 6. – С. 12–21.
7. Гребенникова В.В., Миркин Е.Л. База Данных (БД) "SEISMIC INTENSITY" («СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ»). – Кыргызпатент. Авторское свидетельство № 25 от 17 июня 2015 г.
8. Миркин Е.Л., Гребенникова В.В. Программа "SEISMIC INTENSITY" («СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ»). – Кыргызпатент. Авторское свидетельство № 369 от 17 июня 2015 г.
9. Джанузаков К.Дж., Омуралиев М., Омуралиева А., Ильясов Б.И., Гребенникова В.В. Сильные землетрясения Тянь-Шаня (в пределах территории Кыргызстана и прилегающих районов стран Центральной Азии). – Бишкек: Илим, 2003. – 215 с.
10. Каталог землетрясений Института сейсмологии Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. – Фонды ИС НАН КР, 2017.
11. Catalogue of Earthquakes in Tianshan Area (Chief Editor Zhu Lingren, Urunqi, 1997). – Inland earthquake. – 11. – Supplement June, 1997. – 183 p.
12. Фролова А.Г. (по региону), Шукурова Р. (по региону), Берёзина А.В. (по региону), Соколова Н.П. (Кыргызстан), Гессель М.О. (Казахстан), Тулаганова М.Т. (Узбекистан) (отв. сост.), Молдобекова С., Першина Е.В., Афонина Л.Р., Неверова Н.П., Бектурганова Б.Б., Содикова Н.М., Кучкарова К.И. (сост.). Каталог землетрясений Центральной Азии за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
13. Камчыбеков М.П., Усманова М.Т., Фролова А.Г., Джураев А., Егембердыева К.А., Нурматов У.А., Камчыбеков Ы.П., Чаримов Т.А. Канское землетрясение 19 июля 2011 г. с $K_p=14.1$, $MS=6.2$, $I_0=8-9$ (Кыргызстан–Узбекистан) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 379–391.