

СЕЙСМОЛОГИЯ SEISMOLOGY

УДК:550.348

*Данабаева А.Т.,
старший научный сотрудник
Danabayeva A.T.,
senior researcher*

*Сыдыков А.,
доктор физико-математических наук,
академик НАН РК,
Sydykov A.,
academician of NAS RK*

Садыкова А.
*доктор физико-математических наук,
академик IEAS
Sadykova A.
doctor of physical -mathematical sciences,
academician of IEAS*

*ТОО “Институт сейсмологии” МЧС РК, Алматы, Казахстан
LLP Institute of Seismology of the Ministry of Emergency Situations of the RK,
Almaty, Kazakhstan*

**СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЖОНГАРО-БАЛХАШСКОГО РЕГИОНА
ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ****ЖОНГАРО-БАЛХАШ ОБЛУСУНДАГЫ АППАРАТТЫК МААЛЫМАТТАР
БОЮНЧА СЕЙСМИКАЛЫК РЕЖИМ****SEISMIC REGIME OF THE ZHONGARO-BALKHASH REGION ACCORDING
TO INSTRUMENTAL DATA**

Аннотация. Проводятся результаты изучения сейсмического режима слабых землетрясений Жонгаро-Балхашского региона за период инструментальных наблюдений за 1951-2022 гг. Проведено районирование территории по величине сейсмической активности и по глубине залегания очагов землетрясений. Выделена наиболее сейсмоактивная зона, приуроченная к Южной Жонгарии. Результаты работы используются при оценке сейсмической опасности территории.

Аннотация. 1951-2022-жылдардагы инструменталдык байкоолордун мезгилине Жоңгаро-Балкаш аймагындагы алсыз жер титирөөлөрдүн сейсмикалык режимин изилдөөнүн жыйынтыгы чыгарылды. Аймакты райондоштуруу сейсмикалык активдүүлүктүн чоңдугуна жана жер титирөө булактарынын пайда болуу терендигине жараша жүргүзүлгөн. Түштүк Жонгария менен чектелген сейсмикалык эн активдүү зона аныкталды. Иштин натыйжалары аймактын сейсмикалык коркунучун баалоодо колдонулат.

Abstract. The results of studying the seismic regime of weak earthquakes in the Zhonggar-Balkhash region for the period of instrumental observations for 1951-2022 are carried out. The zoning of the territory was carried out according to the magnitude of seismic activity and the depth of occurrence of earthquake sources. The most seismically active zone, confined to the South Zhongaria, has been identified. The results of the work are used in assessing the seismic hazard of the territory.

Ключевые слова: Жонгаро - Боро-Хоринский регион, сейсмический режим, сейсмоактивные зоны, очаги землетрясений, сейсмическая опасность.

Негизги сөздөр: Жонгаро-Боро-Хора аймагы, сейсмикалык режим, сейсмикалык активдүү зоналар, жер титирөө булактары, сейсмикалык коркунуч.

Keywords: Zhonggar-Borohoro region, seismicity, seismic regime, seismically active zones, earthquake sources, seismic hazard.

Введение. Детальное изучение сейсмичности и сейсмического режима в плане фундаментальной науки необходимо для выяснения причин и условий возникновения землетрясений, а также закономерностей формирования очаговых зон с целью создания физических моделей сейсмического режима и подготовки сильных землетрясений. С прикладной точки зрения наиболее важным является вопрос оценки степени сейсмической опасности территории [1, 2].

Рассматриваемый регион находится в зоне действия сети сейсмических станций Северного Тянь-Шаня, где региональные инструментальные наблюдения проводятся, начиная с 1927 года, а детальные (сетью высокочувствительных станций) – с 1950 года.

К настоящему времени существующей сетью сейсмических станций на территории Жонгаро-Балхашского региона зарегистрировано большое количество слабых землетрясений, которые могут быть проанализированы статистическими методами с целью создания достоверной картины распределения землетрясений по площади и по глубине. Ниже приводятся основные результаты изучения особенностей сейсмичности, сейсмического режима земной коры по данным инструментальных наблюдений за 1951-2022 гг.

Материалы и методика. В работе использован каталог землетрясений Восточного Тянь-Шаня и Жонгарии, созданный на основе инструментальных данных. Информационную основу проводимых исследований составили каталоги составленные в ИС МОН РК и унифицированный каталог землетря-

сений Тянь-Шаня, созданный в результате совместных исследований сейсмологов Казахстана, Кыргызстана и Сейсмологического бюро СУАР КНР для разработки карты сейсмического районирования [5,7]. Последнее уточнение каталога землетрясений Казахстана проведено в рамках выполнения международного проекта CASRI «Оценка сейсмического риска в Центральной Азии» [6].

Для оценки начала представительной регистрации землетрясений используется метод, основанный на графиках накопления числа землетрясений с энергетическими классами $K \geq K_i$ ($K = \lg E$, E - энергия землетрясения в Дж) во времени [8]. Показано, что экспериментальные данные, начиная с определенного момента времени, аппроксимируются прямой линией, т.е. прирост числа землетрясений со временем практически не меняется. Указанный момент времени и является началом представительной регистрации землетрясений того или иного энергетического класса. Полученные результаты уточняются при помощи графиков

отношения чисел $\frac{N_k}{N_{k+1}}$ землетрясений значения, которых, при выполнении условия представительности, должны находиться в пределах 2,5-3,2 (при этом угол наклона графика повторяемости $\gamma = 0,4-0,5$).

Указанный комплекс исследований по оценке представительности слабых землетрясений проведен для основных сейсмоактивных зон рассматриваемой территории.

Их результаты, с учетом данных, ранее полученных по сильным землетрясениям [3], приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка представительности землетрясений с $K \geq K_i$ для основных сейсмоактивных зон территории Жонгаро – Балхашского региона

| № п/п | Наименование зон | Начало времени представительной регистрации землетрясений | | | | | | | | |
|-------|-----------------------|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | $K \geq 7$ | $K \geq 8$ | $K \geq 9$ | $K \geq 10$ | $K \geq 11$ | $K \geq 12$ | $K \geq 13$ | $K \geq 14$ | $K \geq 15$ |
| 1 | Боро-Хоринская | 2003 | 1961 | 1951 | 1951 | 1951 | 1941-45 | 1936-40 | 1901-05 | - |
| 2 | Южно Прибалхашская | 2003 | 1951 | 1951 | 1951 | 1946 | 1941-45 | 1936-40 | 1901-05 | - |
| 3 | Жонгарская | 2004 | 1961 | 1951 | 1951 | 1951 | 1941-45 | 1936-40 | 1901-05 | - |
| 4 | Северо-Жонгарская | 2000 | 1989 | 1959 | 1954 | 1953 | - | - | - | - |
| 5 | Саркандская | 2000 | 1989 | 1964 | 1952 | 1951 | - | - | - | - |

Для изучения пространственного распределения землетрясений были созданы картографические модели эпицентров, сейсмической активности и плоскости эпицентров на различных интервалах глубин. Количественная оценка уровня сейсмической активности проводилась на основе закона повторяемости землетрясений по величине K [1, 9-13].

Результаты и обсуждения. На рисунке 1 приведена карта эпицентров землетрясений с $K \geq 8,6$ ($M \geq 2,5$) за период наблюдений 1961-2022 гг. анализ ее позволяет сделать вывод о неравномерности их площадного

распределения. В пределах рассматриваемой территории высокая концентрация эпицентров землетрясений приурочена к Южной Жонгарии, где подавляющее большинство эпицентров располагается в двух районах, а также к хребту Боро-Хоро – в полосе северо-западного простираения. Остальная часть территории (Северная-Жонгария, Южное Прибалхашье и др.) – характеризуется небольшим количеством землетрясений, эпицентры которых по площади распределены более или менее равномерно. Рассмотрение карты эпицентров слабых землетрясений позволяет выделить на рассматриваемой территории ряд сейсмоактивных зон (рисунок 1).

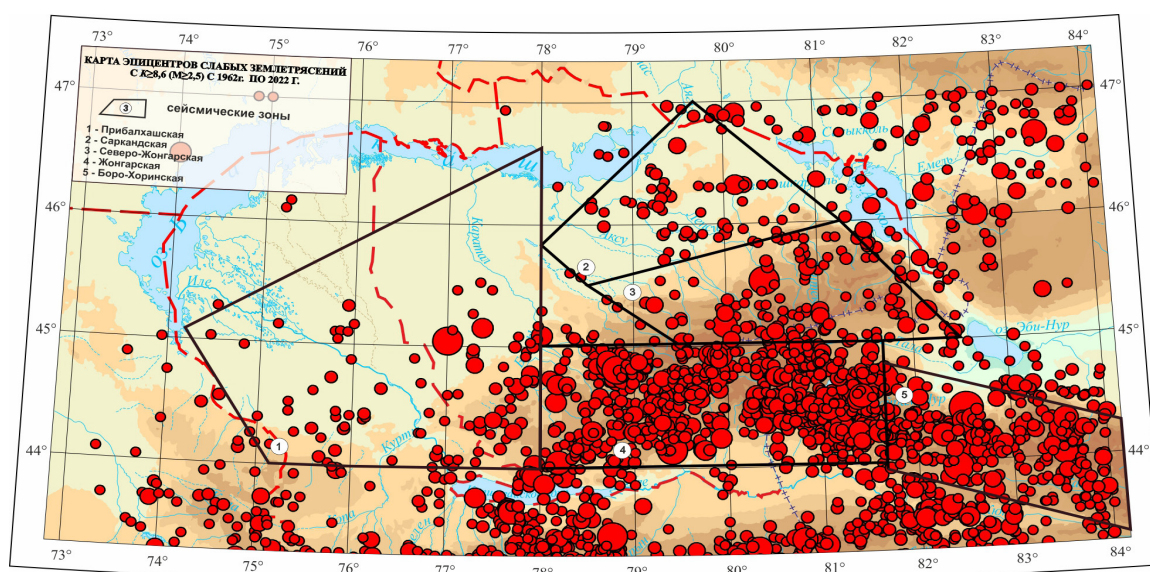


Рисунок 1 - Карта эпицентров землетрясений с $K \geq 8,6$ ($M \geq 2,5$) с 1961 г. по 2022 г.

Определение параметров сейсмического режима проводилось на основе графика повторяемости землетрясений, представляющего собой зависимость между энергетическим классом землетрясений (K) и логарифмом числа землетрясений ($\lg N$), соответствующего конкретному классу [1, 2, 9, 11]. Использовались данные о толчках, представительных в пределах зоны. Графики построены по способу суммирования т.е. по оси ординат отложено число землетрясений с $K \geq K_i$, за счет чего увеличивается точность статистических оттенков [14].

Определение параметров сейсмического режима проведено по методу наименьших квадратов.

Полученные значения параметров сейсмического режима (A_{10} – сейсмическая активность, γ - угол наклона графика повторяемости, S - площадь зоны и др.) даны в таблице 2. Видно, что наибольшим уровнем сейсмической активности характеризуются Боро-Хоринская ($A_{10}=0,202$) и Жонгарская ($A_{10}=0,064$) зоны самыми низкими уровнями сейсмической активности обладают Саркандская ($A_{10}=0,007$) и Южно-Прибалхашская ($A_{10}=0,004$) зоны.

Таблица 2 – Параметры сейсмического режима основных сейсмоактивных зон

| № зон | Название зон | S , км ² | Период наблюдения | K_{np} | A_{10} | γ |
|-------|----------------------|-----------------------|-------------------|----------|----------|----------|
| 1 | Жонгарская | 45750 | 1961-2022 | 8,0 | 0,064 | 0,43 |
| 2 | Северо-Жонгарская | 29644 | 1989-2022 | 8,0 | 0,019 | 0,47 |
| 3 | Саркандская | 28462 | 1989-2022 | 8,0 | 0,007 | 0,56 |
| 4 | Южно - Прибалхашская | 82607 | 1951-2022 | 8,0 | 0,004 | 0,47 |
| 5 | Боро-Хоринская | 25199 | 2003-2022 | 7,0 | 0,202 | 0,52 |

Модель сейсмической активности является одним из основных методов картирования территориального распределения сейсмичности [1, 9-12, 14]. Под сейсмической активностью (A_{10}) в данной точке понимается среднее число землетрясений в определенном диапазоне энергетической величины (в нашем случае $K_0=10$), которые возникают в окрестности этой точки на единицу площади и в единицу времени. Практически величина сейсмической активности определяется путем учета землетрясений не только стандартного класса $K_0=10$, но по всей совокупности представленных землетрясений. Значения активности определяются по формуле (1):

$$A_{10} = \frac{(1 - 10^{-\gamma})}{10^{-\gamma(K_{\min} - K_0)}} \times \frac{SN_{\Sigma}}{\Delta ST}$$

где γ – среднее значение угла наклона

K_{\min} – уровень представительности т.е. класс землетрясений, начиная с которого ведется счет их числа; $K_0 = 10$; S – размер площадки осреднения; T – период наблюдения; $S=1000 \text{ км}^2$; ΔS – площадь осреднения.

Карта сейсмической активности, приведенная на рисунке 2 дает наглядное представление о пространственном распределении сейсмичности. Наибольшим значением сейсмической активности характеризуются районы хребта Южной Жонгарии ($A_{10}=0,05-0,1$). Локальные максимумы A_{10} наблюдаются в районах восточного окончания Северной Жонгарии ($A_{10}=0,02$). Наименьшими значениями сейсмической активности характеризуются Алакольская впадина и Южное Прибалхашье ($A_{10}=0,001-0,002$).

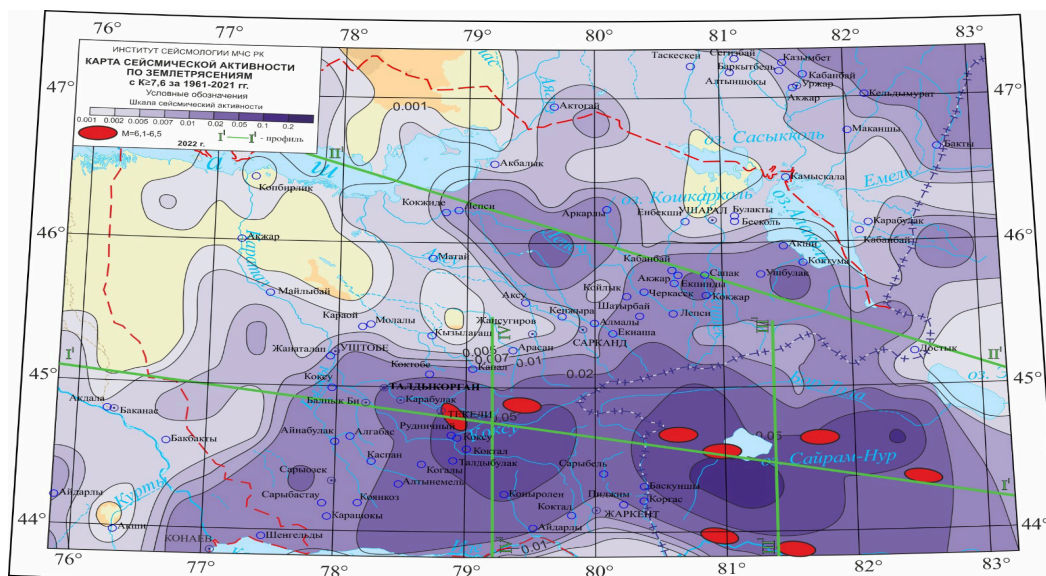


Рисунок 2 – Карта сейсмической активности по землетрясениям с $K \geq 7,6$ ($M \geq 2,0$) за 1961-2022 гг. (I-I', II-II', III-III', IV-IV' – плановое расположение профилей)

Как свидетельствуют имеющиеся данные, линии максимальной сейсмической активности, как правило, ориентированы в близширотном и северо-западном направлениях. Близширотные аномалии A_{10} приурочены к Южно-Жонгарской и Боро-Хоринской зонам. В пределах последней попадают

эпицентры разрушительных землетрясений, которые произошли в 1812 г. ($M=7,5-8,0$), в 1906 г. ($M=7,5-8,0$) и в 1944 г. ($M=7,2$). В Южно-Жонгарской зоне имели место Текелийское 1993 г. ($M=6,1$; $K=15$), Джунгарское 1958 г. ($M=6,4$; $K=15$), Кульджинское 1921 г. ($M=6,5$; $K=15$) землетрясений [1, 2, 4].

Цепочки аномалии A_{10} северо-западного направления отмечаются вблизи Восточного окончания Северной Жонгарии.

При изучении сейсмического режима важное значение имеют сведения о глубинах залегания очагов землетрясений. Положение с определением глубин очагов землетрясений остается сложным в том плане, что для многих очагов значения глубин после проведения сводной обработки остаются неопределенными в силу объективных причин. Поэтому, для проведения анализа глубинного распределения очагов землетрясений, важным является использование материалов тех лет, когда сеть была наиболее развитой с максимальным количеством сейсмических станций. Вторым очень важным моментом является однородность материалов по методике определения глубины очагов землетрясений [11, 15, 16]. В каталогах Северного Тянь-Шаня в разные периоды времени использовались разные подходы к оценке глубины: для сильных землетрясений имелись определения глубин по макросейсмическим данным, для очень малого количества слабых – по усредненной палетке

Ризниченко Ю.В. и графическими методами Вадати или Исикава. С 1980 г. в практику массовых определений глубины вошел способ палеток изохрон по временам $S-P$, базирующийся на сложной скоростной модели региона [16].

Исследовано распределение числа землетрясений по глубинам очагов для Жонгаро-Балхашского региона. Анализ проведен отдельно для землетрясений с $K=4$ и выше рисунок 3. Всего в рассматриваемом регионе глубина очагов определены для 13334 землетрясений. Из данных рисунка 3 видно, что максимальное число очагов отмечается по землетрясением с $K=7$ на глубинах 16-20 км, а наибольшее – с $K=6-7$ – 11-20 км. Приведенные данные свидетельствуют, что, во-первых подавляющее число очагов землетрясений располагается в пределах земной коры на глубинах 11-20 км и, во-вторых, с увеличением энергетического класса землетрясений возрастает и глубина залегания их очагов. Так, очаги всех 36 землетрясений с $K \geq 13$ располагаются на глубинах 11-15 км и глубже.

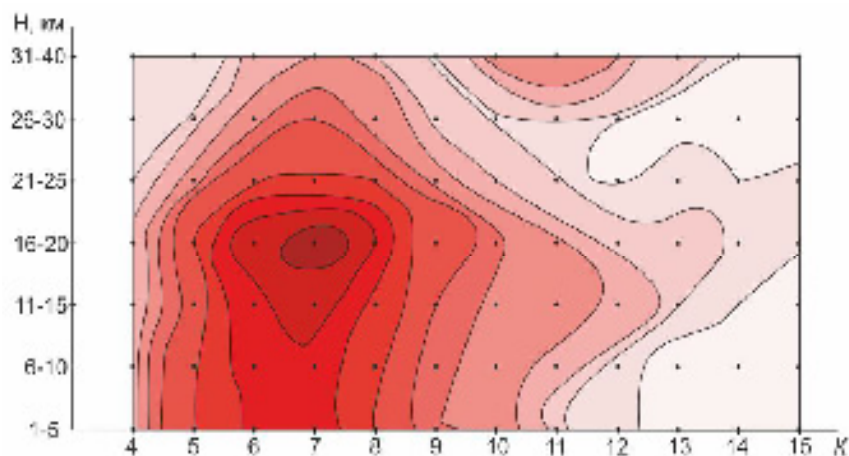


Рисунок 3 – Распределение землетрясений по глубинам залегания очагов (H) и по энергетическим классом (K)

Для настоящей работы важно получить представление по объемной структуре поля сейсмичности. Такую информацию в обобщенном виде дают карты плотности слабых землетрясений, или, как их часто называют в литературе, карты плотности сейсмиче-

ского фона в слоях разной глубины [1, 2, 18]. Карты плотности строились по землетрясениям с $K \geq 5,0$ за 1961-2021 гг. для территории, ограниченной координатами $44^{\circ}00' - 47^{\circ}00'$ с.ш. и $76^{\circ}00' - 83^{\circ}00'$ в.д. (рисунок 4). В приповерхностном слое ($H=0-10$ км) оча-

ги землетрясений заполняют всю площадь, отличаясь значением плотности в различных частях территории (рисунок 4а). Выделяется полоса с высокой плотностью землетрясений близширотного простираения. Территориально она приурочена к хр. Южной Жонгарии.

Внутри полосы поля плотности имеет мозаичную структуру. Максимальная плотность очагов землетрясений отмечается в двух районах. Достаточно четко проявляется зона северо-западного простираения, которая в плане совпадает с восточным окончанием Северной Жонгарии.

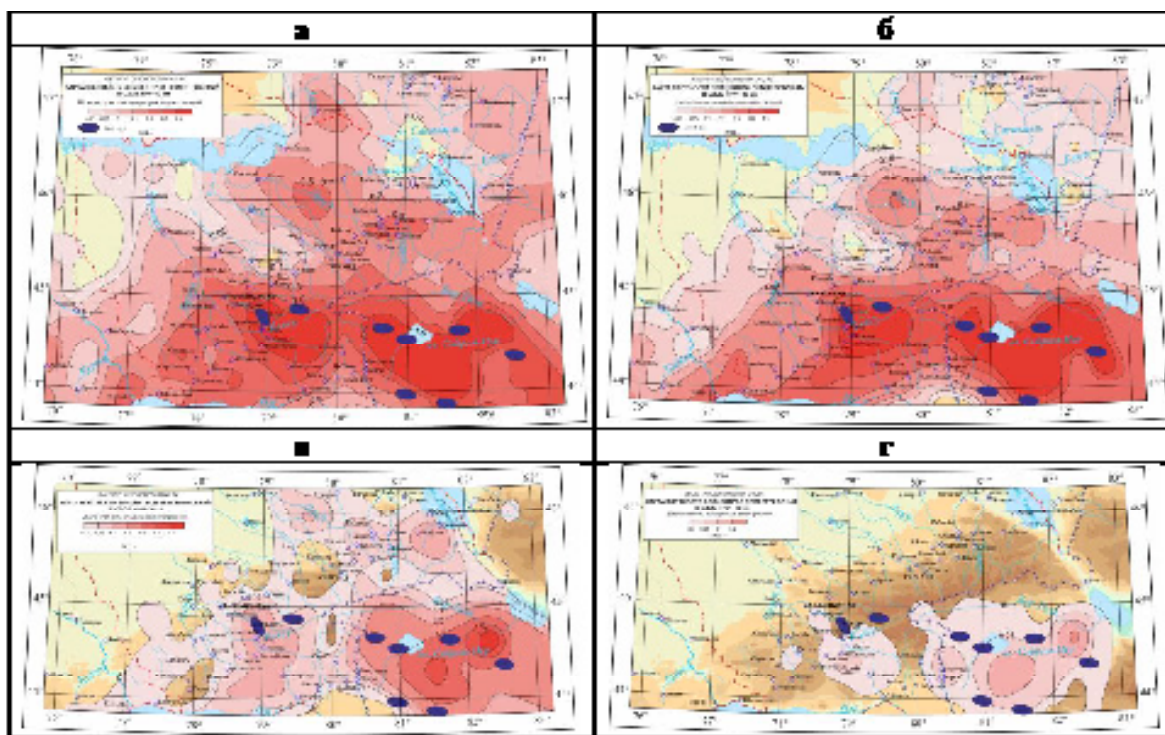


Рисунок 4 – Карты плотности эпицентров землетрясений в интервалах глубин $H=0-10$ км (а), $H=11-20$ км (б), $H=21-30$ км (в) и $H=31-40$ км (г)

Размер и значения максимальной плотности эпицентров у нее значительно ниже чем у зоны, приуроченной к Южной Жонгарии. Картина распределения плотности очагов землетрясений с $H=11-20$ км (рисунок 4б) аналогична предыдущей. С дальнейшим увеличением глубины сейсмоактивного слоя с $H \geq 21$ (рисунки 4в и 4г) отчетливо проявляется тенденция к уменьшению площади областей сейсмического фона с одновременным уменьшением значений плотности. Число землетрясений с глубинами очагов $H \geq 31$ незначительно. Тем не менее, по этим данным выделяется области с наибольшими значениями глубин очагов, приуроченные к южной части Жонга-

рии и имеющие близширотное направление.

Приведенные данные позволяют получить представление о трехмерном сейсмоактивном объеме, в котором сосредоточены очаги подавляющего большинства слабых землетрясений. Детальное рассмотрение областей максимальной плотности очагов землетрясений на разных глубинах позволяет сделать вывод о совпадении их планового положения с увеличением глубины, что возможно свидетельствует о близвертикальном падении сейсмоактивного слоя. Для более детальной оценки пространственной формы сейсмического слоя построены глубинные разрезы (рисунок 5) вдоль (профиль I-I' на

рисунке 2) и в крест (профили III-III¹ и IV-IV¹ на рисунке 2) простирается хребта Южной Жонгарии, а также по восточному окончанию Северной Жонгарии (профиль II-II¹ на рисунке 2). Использовались карты плотности очагов землетрясений для различных интервалов глубин (рисунок 4). Кроме того на рисунке 5 приведены графики изменения уровня сейсмической активности (A_{10}) по выбранным профилям. Анализ данных рисунка показывает, что наибольшие значения сейсмической активности и плотности очагов землетрясений на различных интервалах глубин в плане, в целом совпадают, также можно отметить, что с возрастанием глубины сейсмоактивного слоя величина A_{10} увеличивается.

Как видно из рисунка 5 вид глубинных разрезов вдоль Южной Жонгарии и восточ-

ного окончания Северной Жонгарии имеет форму трапеции, передняя (восточная по профилю I-I¹ и северо-западнее по профилю II-II¹) сторона у которой является более пологой, чем противоположная сторона. Высота трапеции (глубина подошвы сейсмоактивного слоя) составляет 40 км по профилю I-I¹ и 30 км по II-II¹, а длина нижнего основания равна ~330 км по профилю I-I¹ и ~270 км по профилю II-II¹. Глубинные разрезы III-III¹ IV-IV¹ (рисунок 5) позволяет составить представление о форме сейсмоактивного объема поперек структур Южной Жонгарии. Это некоторая фигура, сужающаяся к низу и имеющая наиболее погруженную часть, совпадающую в плане с Южной Жонгарией. При этом протяженность подошвы сейсмоактивного слоя по этим направлениям составляет порядка 100 км. Именно такой объем выделяемый по слабым толчкам, включает в себя будущие очаги сильных землетрясений [1, 2, 17, 18].

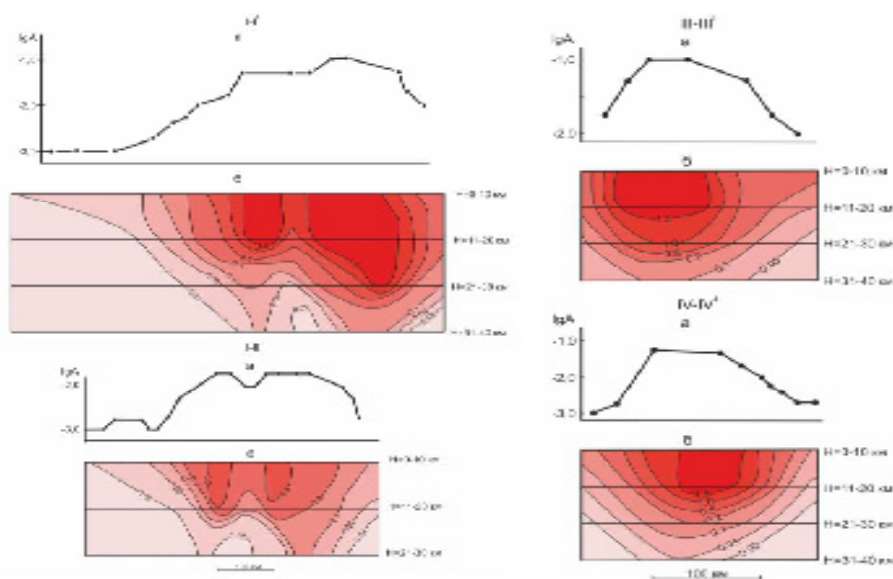


Рисунок 5 – Графики изменения сейсмической активности A (а) и глубинные разрезы (б) по профилям I-I¹, II-II¹, III-III¹, IV-IV¹

Совместный анализ данных о сейсмической активности (рисунок 2), распределении глубин очагов слабых землетрясений и эпицентров разрушительных землетрясений с $M \geq 6.1$ (рисунок 4) показывает, что последние приурочены, во-первых, к областям с высо-

кими значениями сейсмической активности и плотности эпицентров землетрясений или к их краевым частям и, во-вторых, более глубоким слоям сейсмоактивного объема.

Таким образом, можно констатировать, что очаги сильных землетрясений тяготеют

к тем местам, где мощность сейсмоактивного слоя наибольшая. Это подтверждает зависимость способности накопления энергии земной корой от линейных размеров и мощности сейсмоактивного слоя [1, 2, 17]. Из сказанного вытекает, что вероятными местами возникновения будущих сильных землетрясений на рассматриваемой территории следует считать те глубинные сейсмоактивные слои, о которых говорилось выше. Самым значительным из них является сейсмоактивный слой широтного простирания длиной порядка 600 км территориального приуроченный к Южной Жонгарии и хребту Боро-Хоро.

Выводы

В результате статистических исследований сейсмического режима слабых землетрясений проведено районирование территории Жонгаро-Балхашского регио-

на по величине сейсмической активности и глубине залегания очагов землетрясений. Показано, что эпицентры разрушительных землетрясений приурочиваются к областям с высокими значениями сейсмической активности и плотности эпицентров землетрясений или к их краевым частям, а также – с более глубоким залеганием очагов землетрясений. Выделен наиболее опасный сейсмоактивный объем близширотного простирания, приуроченный к хребтам Южной Жонгарии и Боро-Хоро. Полученные результаты используются при оценке сейсмической опасности территории.

Работа выполнена в рамках ПЦФ «Оценка сейсмической опасности территорий областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе», шифр программы ПЦФ-Ф.0980. Источник финансирования - Министерство образования и науки Республики Казахстан.

Литература

1. Сыдыков А. Сейсмический режим территории Казахстана. – Алматы: – Гылым, –2004. – 270 с.
2. Садыкова А.Б. Сейсмическая опасность территории Казахстана. – Алматы, – 2012. – 267 с.
3. Сыдыков А., Садыкова А.Б. Оценка представительности землетрясений с $K \geq 12$ территории юга и юго-востока Казахстана // Изв. АН КазССР. Сер.геол. Деп. 4.10.1988. №2353. – 11 с.
4. Сейсмическое районирование Казахстана / Уразаев Б.М., Акишев Т.А., Нурмагамбетов А., Досымов А., Малинин Е.Г., Попов К.А., Розенблат М.М., Сыдыков А. Алма-Ата: Наука, –1979. – 119с.
5. Каталог землетрясений Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий за 1975-1987гг. / Отв.ред. В.И. Щацкилов. – Алма-Ата: – Наука, 1990. Ч.1 (1975-1982). 202с.; Ч. 2 (1983-1987). – 227 с.
6. Абдрахматов К.Е., Кальметьева З.А., Михайлова Н.Н., Сыдыков А.С., Садыкова А.Б., Силачева И.В., Усманова М.Т., Чеховская Р.А. Сейсмологическая база данных Центральной Азии как основа изучения региональных геодинамических процессов // Напряженно-деформированное состояние земной коры. Геодеформационный процесс и сейсмичность. Тезисы докладов международного симпозиума. – Бишкек. – 2008. – С. 297-302.
7. Джанузакоев К.Д., Шукурова Р., Власова А.А. и др. Каталог землетрясений Тянь-Шаня // *Inlandearthquake*. – 1997. Vol. 11 –183 p.
8. Аранович З.И., Ахалбедашвили А.М., Гоцадзе О.Д. Методика расчета эффективности региональных сейсмических станций на примере Кавказа // Вопросы оптимизации и автоматизации сейсмических наблюдений. – Тбилиси: Мецниереба, – 1977. – С. 27-57.
9. Ризниченко Ю.В. Проблемы детального изучения региональной сейсмичности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1969. №7. – С. 3-20.

10. *Ризниченко Ю.В.* Сейсмический режим и сейсмическая активность // Сейсмическое районирование территории СССР. – М.: –Наука, – 1980. – С. 47-69
11. *Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. Избранные труды. – М.: –Наука, 1985. 406 с.
12. *Нерсесов И.Л., Нурмагамбетов А., Сыдыков А.* Детальное изучение сейсмического режима Казахстана и прилегающих территорий. – Алма-Ата: – Наука, – 1982. –160 с.
13. *Сыдыков А.* Сейсмическое районирование территории юга и юго-востока Казахстана: автореферат.канд. физ.-мат. наук.-М: 1977. – 25 с.
14. *Ризниченко Ю.В., Горбунова И.В.* О методах построения карт сейсмической активности // Сейсмическое районирование СССР, – М.: – Наука, – 1968. – С.71-83.
15. *Ризниченко Ю. В.* Методы массового определения координат очагов близких землетрясений и скоростей сейсмических волн в области распределения очага // Изв. АНССР. Серия геофиз. –1958г. №4. – С. 425-437.
16. *Шацлов В.И.* Обоснование способа массового определения координат очагов местных землетрясений // Прогноз землетрясений.– Душанбе: Дониш, – 1982. №2. – С.173-196.
17. *Шебалин Н. В.* Сильные землетрясения. Избранные труды. – М: Изд. Академии горных наук, – 1997.– 542 с.
18. *Сыдыков А.* Мощность сейсмоактивного слоя территории Казахстана // Вестник МОН РК. – 2000г. №3. – С.88-93.