

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ПО ДАННЫМ АНАЛОГОВЫХ ИСТОРИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ

Комекбаев Д.К.^{1,2}
d.komekbaev@mail.ru

¹ Институт геофизических исследований Национального ядерного центра,
г. Алматы, Казахстан

² Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,
г. Алматы, Казахстан

По записям исторических аналоговых сейсмограмм составлен сейсмический бюллетень мирных ядерных взрывов на территории Центральной Азии. Построены зависимости региональных магнитуд от мощности взрывов. Показано, что эта зависимость существенно зависит от среды, в которой взрывы проводились. Для взрывов, проведенных в соли, наблюдается более резкий рост магнитуд от мощности, чем для взрывов, проведенных в коренных породах. Полученные результаты можно использовать для калибровки сейсмических станций и в задачах мониторинга ядерных испытаний.

Ключевые слова: мирные ядерные взрывы, магнитуда, мощность, исторические сейсмограммы

Введение. На территории СССР, начиная с 1965 года, проводились подземные ядерные взрывы в рамках реализации государственной программы «Ядерные взрывы для народного хозяйства». За период 1965-1988 г. было проведено 124 мирных ядерных взрыва (МЯВ) в интересах народного хозяйства и в научных целях (из них 117 – вне границ ядерных полигонов, остальные были проведены на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП)) [1-4]. По территориальному распределению: 80 МЯВ проведено в РСФСР, 39 — в Казахской ССР, 2 — в Украинской ССР, 2 — в Узбекской ССР, 1 — в Туркменской ССР [1, 4]. Большинство взрывов зарядов (130) было произведено в скважинах, один — в шахте и четыре — в штольнях [3]. МЯВ проводились с целью научных исследований, создания полостей для хранения газоконденсата, создания водохранилищ, тушения газовых фонтанов и др. МЯВ были проведены на обширной территории, в разных геологических условиях, что позволяет исследовать характеристики среды, зависимости сейсмического эффекта от особенностей вмещающей породы и мощности [5].

Для взрывов на территории Казахстана в рамках договора между ИГИ и Мичиганским государственным университетом США в 2013, 2015 гг. были проведены работы по определению точной локализации мест проведения МЯВ на территории Казахстана [6, 7]. Кевинотом Макей и соавторами было проведено уточнение параметров МЯВ на территории Российской Федерации и Украины [8,9]. Таким образом, в настоящее время большинство МЯВ являются эталонными источниками с хорошо известными координатами, их сейсмические записи могут быть использованы для калибровки современных сейсмических станций, для построения региональных годографов и других задач мониторинга [10, 11].

В настоящее время, в Международных сейсмологических Центрах (МСЦ) [12] содержатся бюллетени наиболее мощных МЯВ по данным зарубежных станций, расположенных на эпицентральных расстояниях от 1000 до 15000 км, расположенных в узком створе азимутов. Бюллетени советских сейсмических станций для ядерных испытаний на территории СССР не представлялись в МСЦ. В связи с этим, учитывая большой интерес к эталонным сейсмическим источникам, параметризация сейсмических записей МЯВ, произведенных на территории СССР представляет актуальную задачу для исследований в

области мониторинга ядерных испытаний, а также задач сейсмического распознавания природы источника.

Система наблюдений и использованные материалы. В филиале “Институт геофизических исследований” РГП Национальный ядерный Центр Республики Казахстан (ИГИ) на данный момент имеется большой архив аналоговых сейсмограмм [13]. Весь имеющийся архив ИГИ можно условно разделить на три части: архив обсерватории «Боровое» (1966 – 1990 гг.), архив в г. Курчатов станций Службы специального контроля (1973 – 1996 гг.) и архив в КНЦД (г. Алматы) (рис. 1) [13].

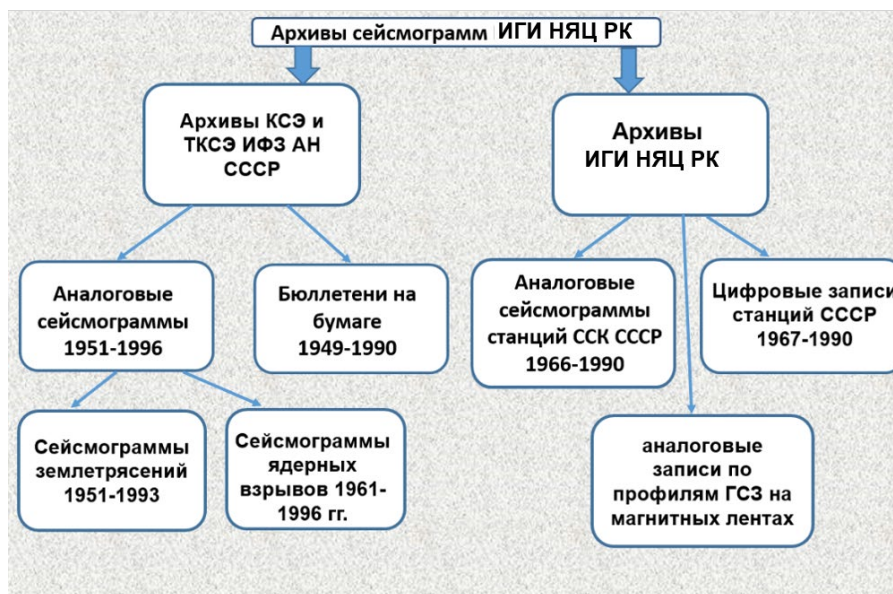


Рисунок 1 – Схема архивов ИГИ НЯЦ РК

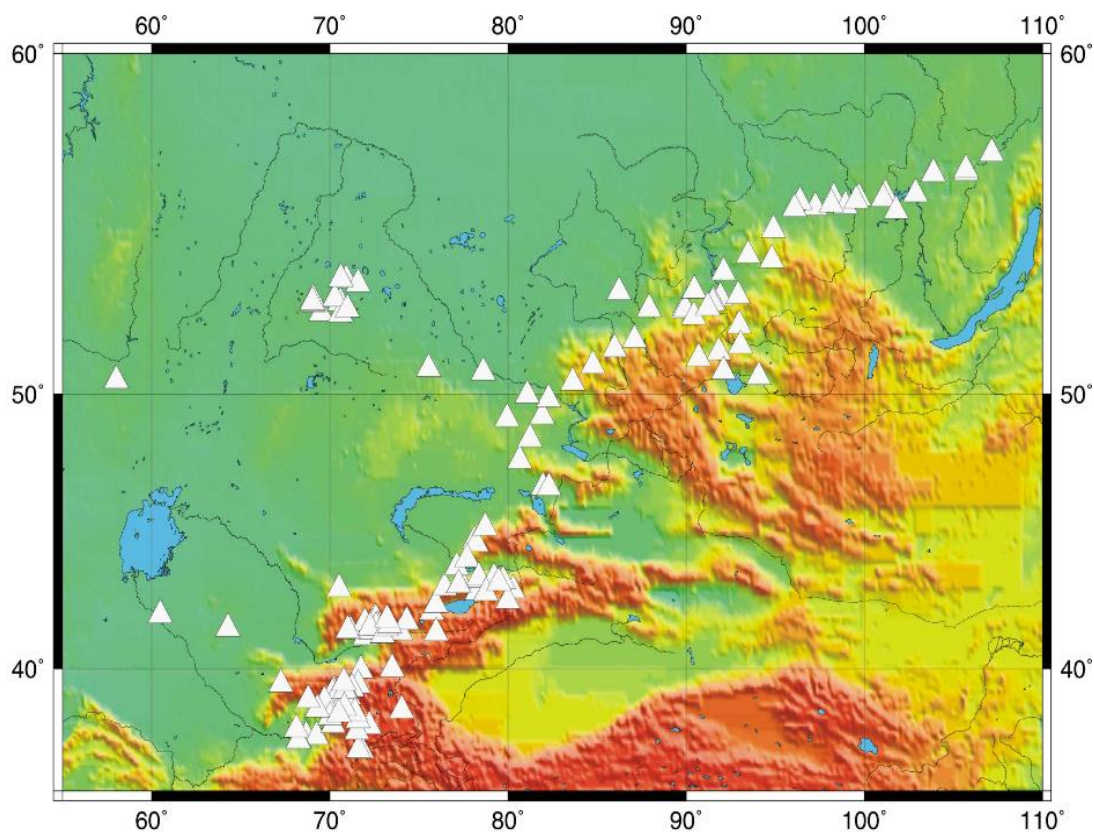


Рисунок 2 – Карта расположения сети аналоговых станций КСЭ ИФЗ АН СССР

На территории КНЦД размещен архив КСЭ ИФЗ АН СССР, станции которой были расположены на территории всего СССР (1951-1996 гг). Общее количество сейсмограмм превышает 300 тыс., среди них есть записи ядерных взрывов со всего мира, проведенные в различных средах, мощных химических взрывов, землетрясений и др. [13]. Кроме сейсмограмм в архиве содержатся записи микробарографа, деформографа, наклономера и др. Основными задачами КСЭ были изучение строения литосферы, мониторинг плотин, в частности, Токтогула, мониторинг ядерных испытаний сейсмическими методами и др [13].

КСЭ было открыто большое количество сейсмических станций (более 200) на территории всего бывшего Советского Союза, как стационарных, так и временных. Все станции были оснащены чувствительными приборами типа СКМ-3, УСФ, КСЭ и РВЗТ с увеличением V от 40 000 до 1200000) [14]. Станции были расположены на Северном Тянь-Шане, Таджикистане, Афганистане, в районе Токтогульского водохранилища, Алтае и Саянах, Урале, Дальнем Востоке, Украине, Кавказе и др. На рис. 2 представлена карта расположения сейсмических станций КСЭ ИФЗ АН СССР в Центральной Азии.

Методика замеров. Для исследований были выбраны записи МЯВ, произведенных на территории Казахстана, Узбекистана, Туркмении и прилегающих к Казахстану районов РФ. Исследуемый район ограничен координатами: $37-53^\circ$ с.ш. и $45-80^\circ$ в.д. Были выбраны аналоговые сейсмограммы станций КСЭ ИФЗ АН СССР за 1965-1987 гг. Для каждой сейсмической станции, данные которых обрабатывались для создания бюллетеня, при помощи программы distaz рассчитаны эпицентральные расстояния, в качестве координат взрывов использовались уточненные с помощью космоснимков, полевых выездов координаты взрывов [6-9]. Для интерпретации сейсмических фаз использовался годограф КСЭ, полученный в работе по изучению строения литосферы с использованием данных профиля Памир-Байкал [15]. Замерялись времена вступления волн P_n , P_g , P , R_g (на вертикальных компонентах), S_n , S , L_g (на горизонтальных компонентах), амплитуды и периоды. Если сейсмическая запись была «зашкалена», то амплитуда с периодом не замерялись, или, если это было, возможно замерялись на заглубленном канале.

После замеров амплитуд и периодов были рассчитаны магнитуды и энергетические классы K [16], а также магнитуда m_b с использованием калибровочной кривой Veith K.F., Clawson G.E. [17], региональная магнитуда m_{rv} с использованием калибровочной кривой Михайловой и Неверовой [18].

В советской практике обработки сейсмических данных широкое распространение получила классификация событий по энергетическим классам K_p , введенная Раутиан Т.Г. [16]. Энергетический класс - количественная мера величины землетрясений, равная десятичному логарифму высвободившейся сейсмической энергии, измеренной в джоулях ($K = \lg E$).

В Казахстане в качестве региональной магнитудной шкалы используется шкала MPV , разработанная Михайловой Н.Н., Неверовой Н.П. [18]. Для ее определения используется региональная калибровочная кривая $\sigma_{reg}(\Delta)$. Магнитуда m_{rv} является аналогом магнитуды m_b .

При определении энергетического класса использовалась максимальная амплитуда в P - и S - фазах сейсмических волн на короткопериодных каналах типа СКМ. Далее расчет K_p производился по формуле

$$K_p = 1.8 \lg(A_p + A_s) + \sigma_K(\Delta), \quad (1)$$

где A_p и A_s – максимальная амплитуда P и S – волн в микронах; $\sigma_K(\Delta)$ – калибровочная функция для $A_p + A_s$ в диапазоне расстояний от 10 до 3000 км.

Для определения m_{rv} измерялась амплитуда и период P – фазы для момента времени, когда колебательная скорость максимальна. Измерения проводились на короткопериодном канале типа СКМ. Значение MPV рассчитывалось по формуле

$$MPV = \lg(A/T) + \sigma_{reg}(\Delta), \quad (2)$$

где A и T – амплитуда и период P -волны, $\sigma_{reg}(\Delta)$ – калибровочная кривая в диапазоне расстояний от 10 до 1200 км.

После расчёта магнитуд по записям каждой станции были рассчитаны средние значения для каждого события.

Для анализа и замеров использованы исторические аналоговые сейсмограммы из архива Комплексной сейсмологической экспедиции Института физики Земли, Академии наук СССР (рис. 3). Обработано 1086 аналоговых сейсмограмм, сделано 1333 замера. Диапазон эпицентральных расстояний 348 (Тартку) - 5942 км (Беличаны). Большинство замеров сделаны для диапазона от 500 до 2500 км.

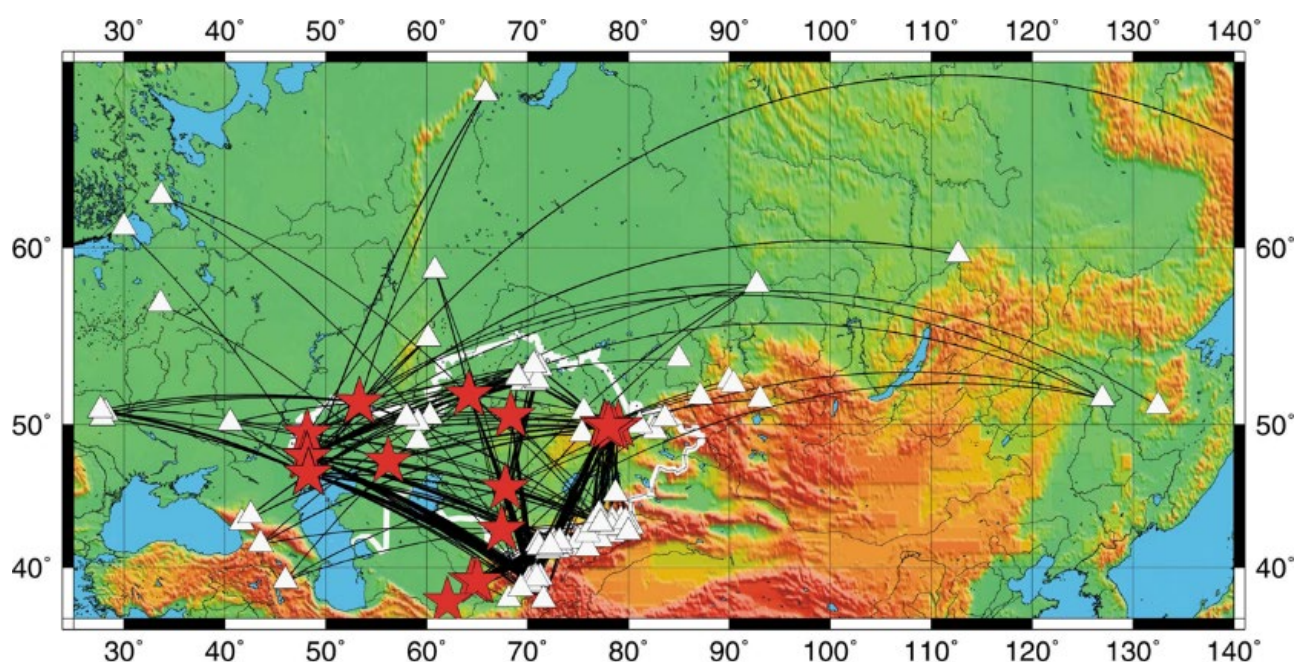


Рисунок 3 – Карта расположения эпицентров МЯВ и зарегистрировавших их станций. Звездочки – места проведения МЯВ, треугольники – сейсмические станции КСЭ

О связи магнитуд ядерных испытаний с их мощностью. Для исследователей в области сейсмического мониторинга поиск зависимости магнитуд от мощности взрыва представляет большой интерес. Особенно эти зависимости важно получить для МЯВ, ведь они были произведены в разной геологической среде, например, в гранитах, песчаниках, соли и др. В ходе работ по созданию сейсмического бюллетеня для мирных ядерных испытаний рассчитывались магнитуды m_{rv} , m_b , и энергетический класс К. Следует отметить, что для одного и того же взрыва наблюдался разброс магнитуд, который связан с тем, что часть станций расположена на территории городов на осадочных грунтах. В связи с этим, на таких станциях систематически завышаются значения энергетических характеристик. Часть станций КСЭ имела очень узкополосную аппаратуру, что приводило, наоборот, к занижению магнитуд. В таком случае, необходимо изучить станционные поправки для каждой станции, однако это достаточно сложная задача, требующая анализа статистически представительного материала и большой объем исследований, поэтому пока мы ограничились использованием станционных магнитуд без поправок.

На рис. 4 приведена зависимость магнитуд m_b для ядерных взрывов, проведенных в разной геологической среде, от мощности взрыва. Видно, что сейсмический эффект взрывов существенно отличается в зависимости от среды – у подземных ядерных взрывов в соли сейсмический эффект значительно выше, чем проведенных в коренных породах.

Для подземных ядерных взрывов в соли:

$$m_b = 4.56 + 0.75 \cdot \lg(Y(kt)), \text{ коэффициент корреляции } R = 0.76.$$

Для подземных ядерных взрывов в коренных породах:

$$m_b = 4.89 + 0.44 \cdot \lg(Y(kt)), \text{ коэффициент корреляции } R = 0.71.$$

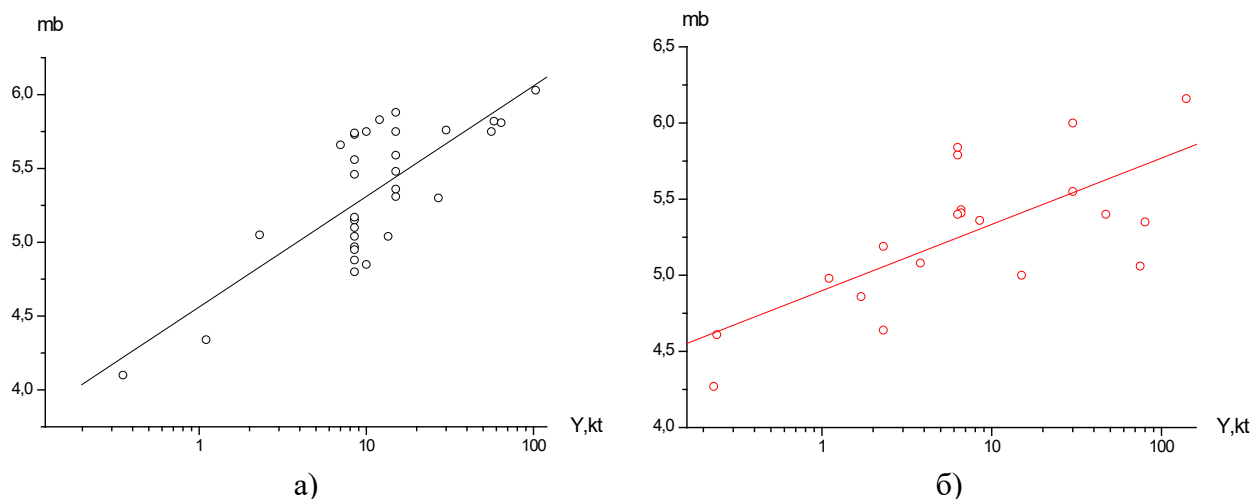


Рисунок 4 – Зависимость магнитуд m_b для ядерных взрывов, проведенных в разной геологической среде, от мощности взрыва. а) для ядерных взрывов в соли, б- в коренных породах.

На рис. 5 приведена зависимость энергетических классов K_p для ядерных взрывов, проведенных в разной геологической среде, от мощности взрыва. Видно, что сейсмический эффект взрывов существенно отличается в зависимости от среды – у подземных ядерных взрывов в соли сейсмический эффект значительно выше, чем у проведенных в коренных породах.

Для подземных ядерных взрывов в коренных породах:

$$K_p = 11.5 + 0.91 \cdot \lg(Y(kt)), \text{ коэффициент корреляции } R=0.54.$$

Для подземных ядерных взрывов в соли:

$$K_p = 10.5 + 1.92 \cdot \lg(Y(kt)), \text{ коэффициент корреляции } R=0.92.$$

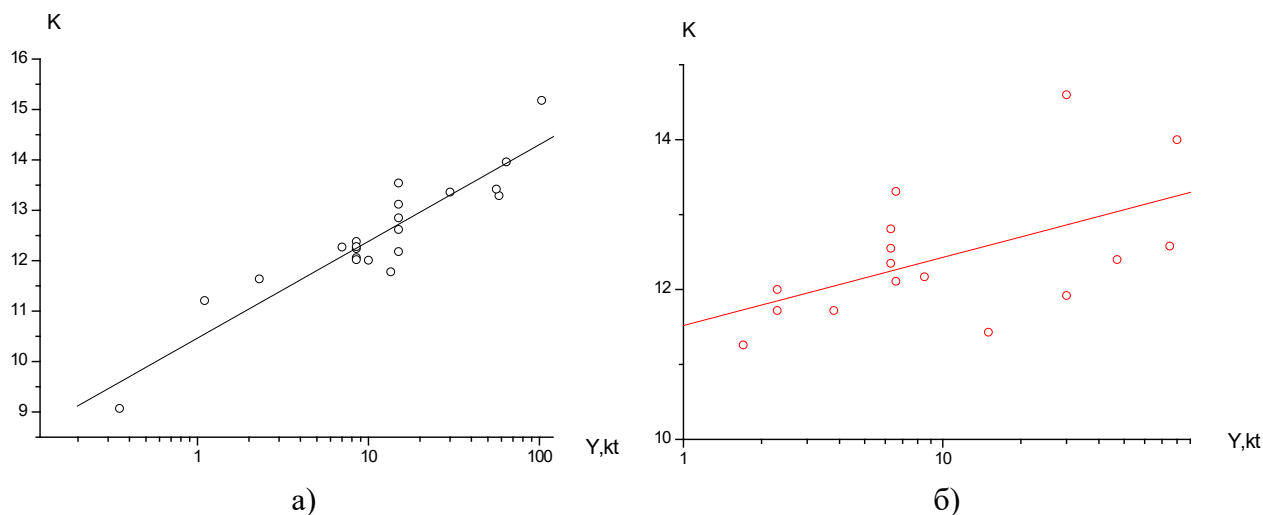


Рисунок 5 – Зависимость энергетических классов K_p для ядерных взрывов, проведенных в разной геологической среде, от мощности взрыва. а) для ядерных взрывов в соли, б- в коренных породах

Выводы. По записям исторических аналоговых сейсмограмм составлен сейсмический бюллетень мирных ядерных взрывов на территории Центральной Азии, было обработано более 1000 сейсмограмм. Изучены зависимости магнитуды m_b и энергетического класса K_p от мощности взрывов и геологической среды. Для взрывов, проведенных в соли, наблюдается

более резкий рост магнитуд от мощности, чем для взрывов, проведенных в коренных породах. Полученные результаты могут использоваться для быстрой оценки мощности ядерного взрыва в ходе мониторинга ядерных испытаний сейсмическими методами.

Литература

1. Краткая характеристика мирных ядерных взрывов, произведённых на территории бывшего СССР в 1965–1988 гг. (по датам проведения): Приложение 1.1 // Мирные ядерные взрывы: Обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / В.Б. Адамский, В.В. Адушкин, Н.В. Безумов и др. М.: ИздАТ. 2001. С. 478–494.
2. Mikhailov V.N. ed. USSR Nuclear weapons tests and peaceful nuclear explosions, 1949 through 1990. RFNC-VNIIEF. 1996. Sarov. 96 p.
3. Электронный ресурс: <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/tests/index.html>
4. Электронный ресурс: <https://ru.wikipedia.org>.
5. Копничев Ю.Ф., Спивак А.А. Сопоставление сейсмических эффектов ядерных и химических взрывов // Вулканология и сейсмология. 1997. С. 104–112.
6. Абишев А.Х., Яковенко А.М., Маккей К.Г. Инструментальное уточнение мест проведения мирных ядерных взрывов на территории Казахстана // Вестник НЯЦ РК. 2016. Вып. 4. С. 92–97.
7. Mackey K, Bergman E. Ground-Truth Locations for the Mangyshlak Peaceful Nuclear Explosion Sequence, Western Kazakhstan // BSSA. Vol. 104. No.4. P. 2116–2119.
8. Mackey K. and Fujita K. Improvement of GT Classification of Soviet PNEs. Department of Geological Sciences Michigan University. 69 p.
9. Маккей К.Г., Фуджита К. Улучшение GT классификации советских мирных ядерных взрывов // Вестник НЯЦ РК. 2014. Вып. 2. С. 62–63.
10. Көмекбаев Д.К., Аристова И.Л., Сейнасинов Н.А. Построение годографа для Южного Казахстана по записям взрывов // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2021. № 2 (18). С. 74–83.
11. Соколова И.Н. Построение годографа для Западного Казахстана по записям промышленных ядерных взрывов // Вестник НЯЦ РК. 2008. Вып. 1. С. 63–67.
12. Электронный ресурс: www.isc.ac.uk.
13. Бекбулатова Д.Б., Михайлова Н.Н., Соколова И.Н. Исторические записи ядерных взрывов в архиве Института геофизических исследований // Вестник НЯЦ РК. 2020. Вып. 3. С. 65–72.
14. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Ред.: Аранович З.И. и др. М.: Наука. 1974. 245 с.
15. Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г. Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500 км от эпицентра // Экспериментальная сейсмика. Труды ИФЗ АН СССР. М.: Наука. 1964. С. 63–87.
16. Veith K.F., Clawson G.E. Magnitude from short period P-wave data. BSSA, 1972, 62, No. 2, p. 435–452.
17. Михайлова Н.Н., Неверова Н.П. Калибровочная функция для определения магнитуды MPVA землетрясений Северного Тянь-Шаня // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. Алма-Ата: Наука. 1986. С. 41–47.
18. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях 3000 км // Труды ИФЗ АН СССР. 1964. № 32 (199). С. 72–98.