

УДК 550.34.06

Михайлова Н. Н., Аристова И. Л., Комекбаев Д.К.

Филиал «Институт геофизических исследований» НЯЦ РК, г. Алматы, Казахстан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСТОРИЧЕСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Аннотация. В работе показано, как проводится подготовка к использованию в научных целях аналоговых исторических сейсмограмм мирных ядерных взрывов, имеющих в архивах бумажных сейсмограмм различных организаций. Создана база «Метаданные», в которой собраны, проверены и уточнены данные по станциям и аппаратуре, зарегистрировавшим мирные ядерные взрывы. Затем проведена работа по созданию уточнённого каталога мирных ядерных взрывов, в котором дополнены по вновь измеренным на записях характеристикам значения магнитуд и энергетических классов, по некоторым взрывам уточнено местоположение эпицентров взрывов. Создан сейсмический бюллетень по результатам обработки 3201 аналоговой сейсмограммы. Этот бюллетень является основой проведения научных исследований в целях повышения эффективности сейсмического мониторинга. Построены годографы региональных сейсмических волн, получены соотношения, связывающие мощность взрывов с сейсмическими магнитудными и энергетическими параметрами. Проводится оцифровка сейсмограмм мирных ядерных взрывов.

Ключевые слова: мирный ядерный взрыв, аналоговые сейсмограммы, каталог, сейсмический бюллетень, магнитуда, мощность, архив, база данных.

ТЫНЧТЫК ЯДРОЛУК ЖАРДЫРУУЛАРДЫН ТАРЫХЫЙ СЕЙСМИКАЛЫК ЖАЗУУЛАРЫН СЕЙСМИКАЛЫК МОНИТОРИНГ ҮЧҮН КОЛДОНУУ

Кыскача мазмуну. Макалада ар кандай уюмдардын кагаз сейсмограммаларынын архивдеринде сакталган тынчтык максаттагы ядролук жардыруулардын аналогдук тарыхый сейсмограммаларын илимий максаттарда колдонууга кандай даярдыктар көрүлүп жаткандыгы көрсөтүлөт. «Метамаалыматтар» базасы түзүлдү, анда тынчтык максатта ядролук жардырууларды каттаган станциялар жана жабдуулар жөнүндө маалыматтар чогултулду, текшерилилди жана такталды. Андан кийин тынч ядролук жардыруулардын жаңыланган каталогун түзүү боюнча иштер жүргүзүлдү, анда магнитудалардын жана энергетикалык класстардын маанилери жазуулар боюнча жаңы өлчөнгөн мүнөздөмөлөрдүн негизинде толукталды, ал эми кээ бир жарылуулар үчүн жарылуулардын эпицентрлеринин жайгашкан жери аныкталды. такталды. 3201 аналогдук сейсмограмманы иштетүүнүн жыйынтыгы боюнча сейсмикалык бюллетень түзүлдү. Бул бюллетень сейсмикалык мониторингдин эффективдүүлүгүн жогорулатуу боюнча илимий изилдөөлөргө негиз түзөт. Аймактык сейсмикалык толкундардын годографтары түзүлүп, жарылуулардын күчү сейсмикалык чоңдук менен энергетикалык параметрлердин катыштарынын байланыштары алынды. Тынчтык максаттагы ядролук жардыруулардын сейсмограммалары цифрлаштырылды.

Негизги сөздөр: тынч ядролук жардыруу, аналогдук сейсмограммалар, каталог, сейсмикалык бюллетень, магнитуда, күч, архив, маалымат базасы.

APPLICATION OF HISTORICAL SEISMIC RECORDS OF PEACEFUL NUCLEAR EXPLOSIONS TO SOLVE SEISMIC MONITORING TASKS

Abstract. The paper demonstrates the process of preparing analogue historical seismograms of peaceful nuclear explosions available in the archives of paper seismograms in

various organizations for scientific use. A «Metadata» database that contains verified and precised data on stations and equipment that recorded peaceful nuclear explosions was created. Subsequently, an updated catalogue of peaceful nuclear explosions was created. This involved supplementing the values of magnitudes and energy classes based on newly measured characteristics of the records and clarifying the location of the explosions' epicenters for some explosions. A seismic bulletin was created based on the results of processing 3201 analogue seismograms. This bulletin forms the basis for scientific research to improve the efficiency of seismic monitoring. The travel-time curves for regional seismic waves were constructed, and relations linking explosion yield with seismic magnitude and energy parameters were obtained. Seismograms of peaceful nuclear explosions are being digitized.

Keywords: peaceful nuclear explosion, analogue seismograms, catalogue, seismic bulletin, magnitude, yield, archive, database.

На территории СССР с 1965 г. по 1988 г. было произведено 124 мирных ядерных взрыва (МЯВ). Программу «Ядерные взрывы для народного хозяйства» начали готовить в конце 50-х годов, после первых удачных ядерных испытаний. В период с 1965 по 1988 годы в рамках программы было произведено 124 мирных ядерных взрыва. Почти все (117 из 124) взрывы были произведены вне границ ядерных полигонов. В то время уже были запрещены воздушные и подводные взрывы, поэтому все взрывы были подземными, которые, в основном, проводились в скважинах, лишь один — в шахте и четыре — в штольнях [1]. Большинство взрывов (80 событий) были произведены на территории России, 39 - в Казахстане, по два взрыва на территории Украины и Узбекистана, один взрыв - в Туркменистане. Мирные ядерные взрывы можно разделить на несколько групп: взрывы на выброс - с целью глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхней мантии; интенсификации добычи нефти и газа; гашения аварийных фонтанов; образования полостей; дробления руды. Первый и самый сильный мирный термоядерный взрыв мощностью 140 кт был произведён на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП), на площадке Балапан (рисунок 1). Это был взрыв на выброс, при котором большое количество породы выбрасывается и создаётся воронка. Он был предназначен для создания искусственного водоёма. После взрывания на месте воронки образовалось озеро Чаган.

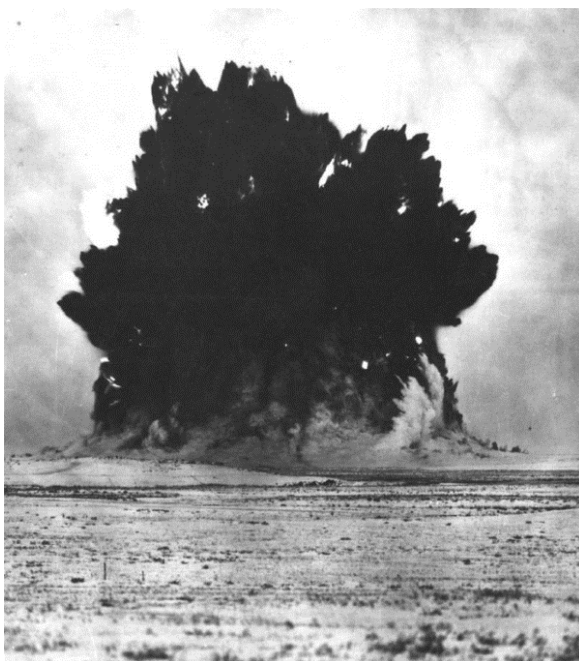


Рисунок 1. Первый мирный ядерный взрыв ЧАГАН.

Мирные ядерные взрывы для создания подземных ёмкостей проводились в Казахстане на площадке Азгир, первый из которых был проведён в 1966 году. Затем было проведено в этих целях более 30 взрывов.

С помощью ядерных взрывов тушили газовые фонтаны. Так, на месторождении Урта-Булак был впервые потушен газовый факел, который не могли затушить около 3-х лет.

Исторические сейсмограммы мирных ядерных взрывов до сих пор представляют большой интерес для исследователей разных стран, так как содержащаяся в них информация является ценным материалом для решения многих научных задач. В Институте геофизических исследований Республики Казахстан на данный момент имеется большой архив аналоговых сейсмограмм [2]. 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 Казахстанского Национального Центра Данных (КНЦД, г. Алматы).

На территории КНЦД размещена часть архива Комплексной Сейсмологической Экспедиции Института физики Земли Академии наук СССР (КСЭ ИФЗ АН СССР), станции которой были расположены на территории всего СССР и работали в 1951-1996 гг. Общее количество сейсмограмм превышает 300 тыс., среди них есть записи ядерных взрывов со всего мира, произведённые как на испытательных полигонах, так и мирные ядерные взрывы в различных средах, записи мощных химических взрывов, землетрясений и др. [2]. Кроме сейсмограмм в архиве содержатся записи микробарографа, деформографа, наклономера и др. После перемещения архива сейсмограмм из закрытой КСЭ ИФЗ АН СССР в КНЦД началась большая работа по разблоке и систематизации архива уже в КНЦД. Он был разделён на 2 части: одна - сейсмограммы ядерных, химических калибровочных взрывов, землетрясений из районов ядерных полигонов и вторая – архив остальных сейсмограмм, содержащий записи землетрясений, промышленных взрывов и других явлений.

Следующей задачей, после создания архива, стала задача создания базы данных (метаданных), что является важным этапом в формировании рабочей базы для исследования исторических сейсмограмм мирных ядерных взрывов на территории СССР.



Рисунок 2. Фотография архива ядерных взрывов в КНЦД.

В сейсмическую сеть Комплексной сейсмологической экспедиции (КСЭ), созданной Институтом физики Земли (ИФЗ) АН СССР в г. Талгар, входили сейсмические станции (стационарные и временные), расположенные по всей территории СССР. В задачи этой сети

входил не только мониторинг землетрясений и изучение строения литосферы, но и обнаружение, распознавание ядерных испытаний на региональных и телесеismicких расстояниях. Все станции были оснащены чувствительными приборами типа СКМ-3, УСФ, КСЭ и РВЗТ с усилением V от 40 000 до 120 000) [4]. Большинство из этих станций расположены в местах с низким уровнем сейсмических шумов, что позволило регистрировать даже слабые подземные ядерные взрывы на телесеismicких расстояниях.

Собраны сведения о параметрах 233 станций (рисунок 3) на территории бывшего СССР для базы метаданных мирных ядерных взрывов. Следует отметить, что точность определения координат станций, которые занесены в каталоги, различна для разных станций, поскольку в одних случаях координаты определены по топографическим картам различного масштаба, по литературным данным, в других случаях - с использованием топопривязки системы GPS различного класса. Для некоторых станций координаты уточнялись с записей на сейсмограммах. Некоторые станции в течение данного периода один или два раза меняли свое местонахождение, что тоже было учтено в процессе сбора метаданных. На основе собранных данных созданы два типа баз метаданных: 1 - описательный в таблице Excel; 2 - таблицы site в формате CSS3.0 для оцифрованных событий.

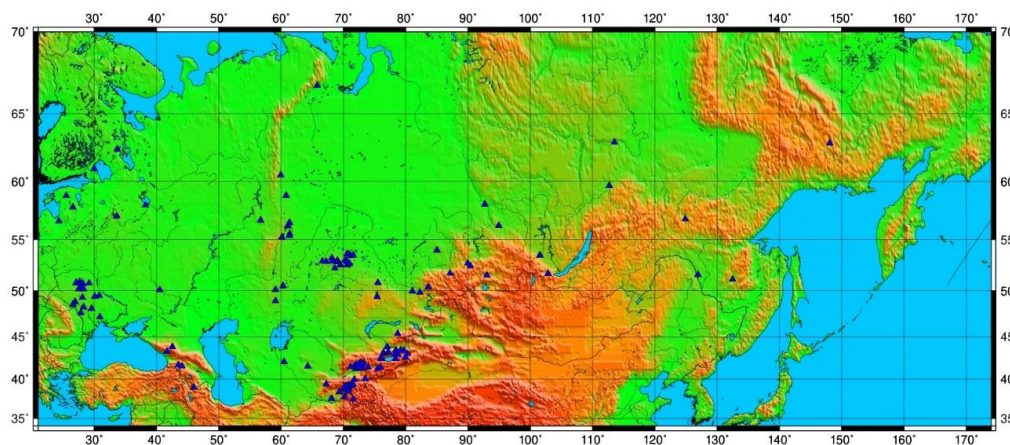


Рисунок 3. Карта расположения сейсмических станций, включенных в базу метаданных для мирных ядерных взрывов.

Как уже говорилось, мирные ядерные взрывы, как и все ядерные взрывы, очень важны для сейсмологического сообщества, потому что являются эталонными событиями и могут использоваться для различных задач, но для этого нужно точно знать координаты взрывов и время их проведения. Мы уделили большое внимание изучению литературы по уточнению параметров мирных ядерных взрывов [5, 6, 7 и другие]. Используя данные источники, нами в каталоге мирных ядерных взрывов были исправлены координаты 21 взрыва.

Так, в качестве примера, в непосредственной близости от площадки «Сары-Узень» 7 декабря 1974 года было осуществлено подземное ядерное испытание «Лазурит» с направленным выбросом грунта для создания плотины. В изданном каталоге мирных ядерных взрывов СССР местоположение ядерного взрыва «Лазурит» числилось с координатами $lat = 49.916^\circ$ с.ш., $lon = 77.605^\circ$ в.д. Но на местности с этими координатами никаких следов взрыва не наблюдалось. После изучения литературных источников было найдено описание этого направленного взрыва и его характерных следов. «Этот взрыв был проведён в урочище Муржик 7 декабря 1974 года на склоне крутизной 20 градусов. Мощность взрыва 1.7 кт, глубина заложения ядерного устройства - 75 м. В результате сброса грунта по горному склону образовался куполообразный навал раздробленной породы с диаметром 200 м и высотой 14 м...» [8]. Затем на космическом снимке высокого

разрешения было найдено место взрыва и определены его точные координаты (рисунок 4).



Рисунок 4. Местоположение эпицентра мирного ядерного взрыва «Лазурит» на космическом снимке.

Уточнённые по космическому снимку координаты взрыва $lat = 49.9221^\circ$ с.ш., $lon = 77.5469^\circ$ в.д. оказались в 4.2 км к ЗСЗ от координат изданного каталога мирных ядерных взрывов СССР. Уточнённое местоположение эпицентра мирного ядерного взрыва «Лазурит» относительно боевых скважин на испытательной площадке «Сары-Узень» показано на рисунке 5. Эпицентр ядерного взрыва «Лазурит» находится в зоне Главного Чингизского разлома. Новые координаты внесены в каталог МЯВ.

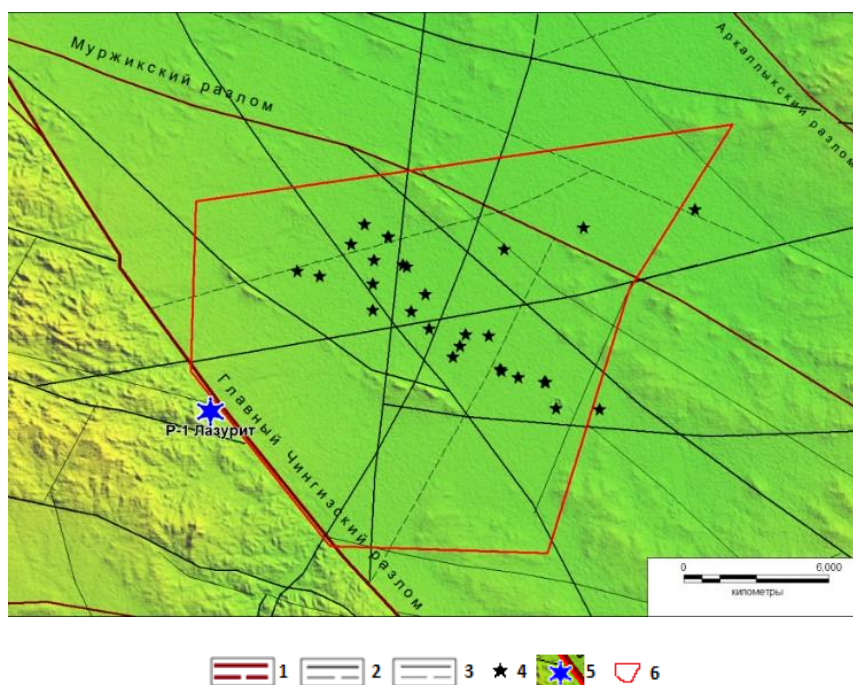


Рисунок 5. Уточнённое местоположение эпицентра мирного ядерного взрыва «Лазурит» в районе испытательной площадки подземных ядерных взрывов «Сары-Узень». 1 – разломы первого порядка в коренных породах и перекрытые рыхлыми отложениями (пунктиром); 2– разломы второго порядка; 3 – разломы третьего порядка; 4 – боевые скважины подземных ядерных взрывов; 5 – ядерное испытание – «Лазурит»; 6 – контур участка «Сары-Узень»; в качестве подложки использована ЦМР с разрешением 30 м.

Был составлен уточнённый каталог мирных ядерных взрывов, для которых у нас в архиве имеются записи на сейсмограммах. Он состоит из 107 взрывов. На рисунке 6 представлена карта расположения эпицентров взрывов, сейсмические записи которых были обработаны и по которым составлен сейсмологический бюллетень. При составлении бюллетеня для всех взрывов, у которых имеются записи, рассчитаны магнитуды и классы.

Следующей задачей была оцифровка мирных ядерных взрывов. На данный момент оцифровано 1074 сейсмограммы мирных ядерных взрывов за 1965–1988 гг., диапазон расстояний составил 521–6729 км. На рисунке 7 приведена карта расположения эпицентров ядерных взрывов и сейсмических станций, записи которых использовались для оцифровки. На рисунке 8 приведена диаграмма распределения оцифрованных сейсмограмм мирных ядерных взрывов на территории СССР по расстояниям, на рисунке 9 – пример оцифрованной сейсмограммы мирного ядерного взрыва 10.03.1987 то=15 час.14мин. 57.4 сек., lat = 47.60°, lon = 56.20°, mb = 5.3, станция MNAS.

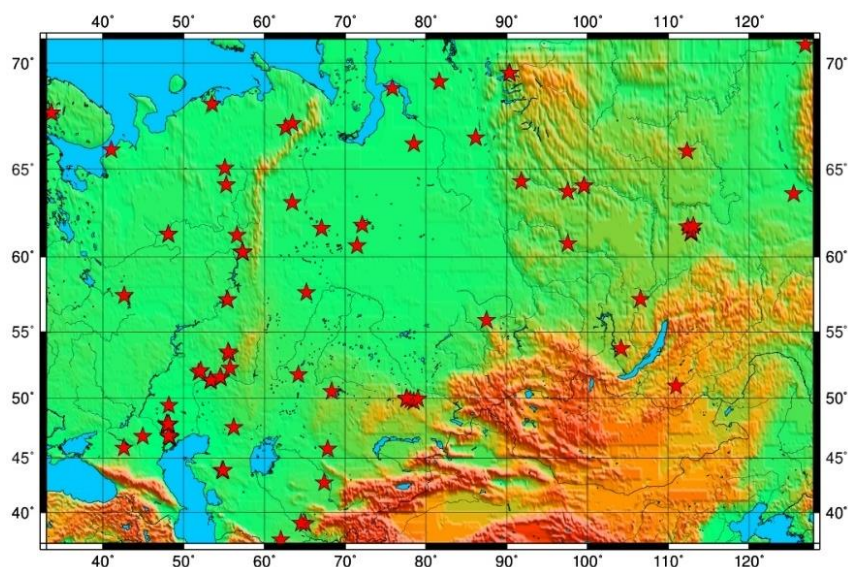


Рисунок 6. Карта расположения эпицентров МЯВ, по которым составлен сейсмологический бюллетень.

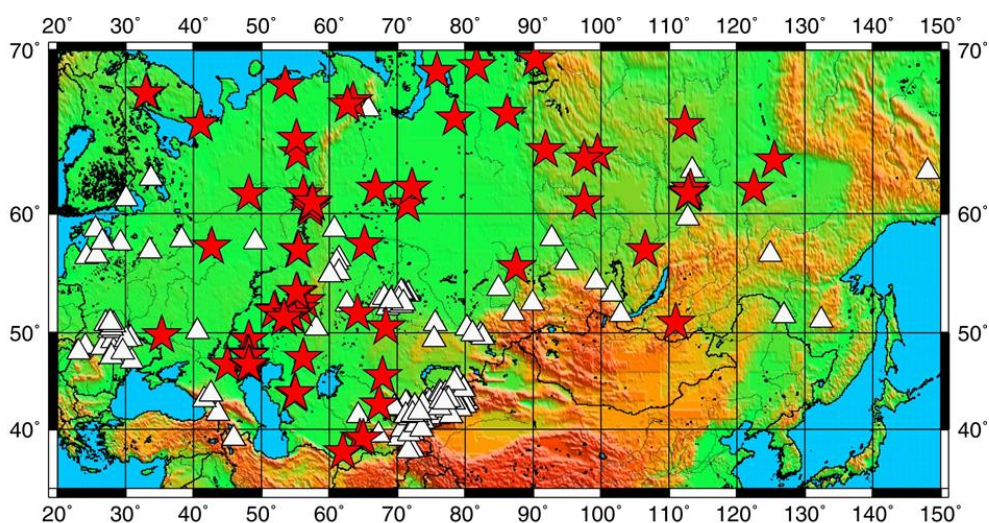


Рисунок 7. Карта расположения эпицентров мирных ядерных взрывов, произведённых на территории СССР, и сейсмических станций, записи которых использовались для оцифровки. Звёздочки – эпицентры взрывов, треугольники – сейсмические станции.

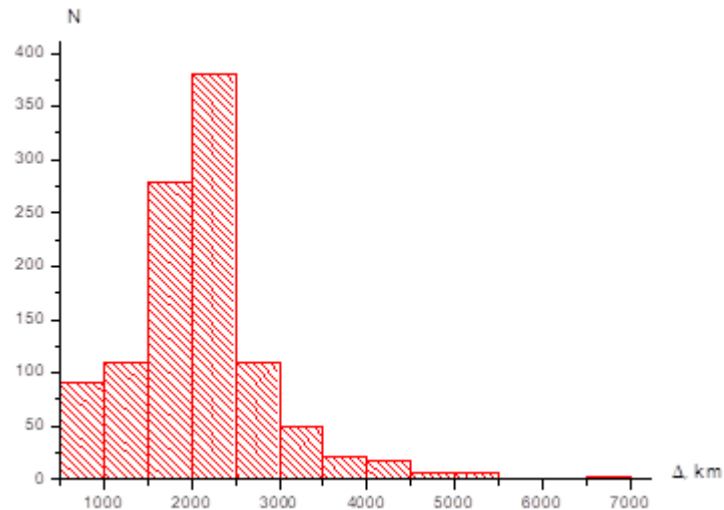


Рисунок 8. Распределение эпицентральных расстояний оцифрованных записей мирных ядерных взрывов.

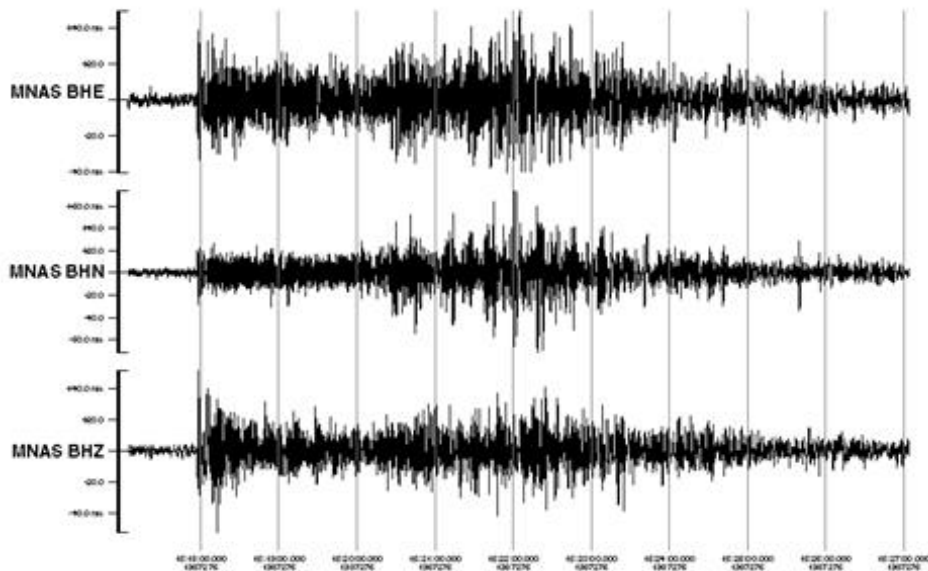


Рисунок 9. Пример оцифрованной сейсмограммы мирного ядерного взрыва 10.03.1987, $t_0 = 15-14-57.4$, $lat = 47.60^\circ$, $lon = 56.20^\circ$, $mb = 5.3$, станция MNAS.

Однако оцифровке подлежат далеко не все аналоговые исторические сейсмограммы, а только небольшая их часть. Большое количество записей на региональных расстояниях «зашкалены», превышен динамический диапазон регистраторов, некоторые старые сейсмограммы либо выцвели, либо потемнели, либо имеют дефекты. В связи с этим, большинство аналоговых сейсмограмм так и останутся неоцифрованными. Но они тоже могут быть использованы для проведения замеров. Такие записи должны быть параметризованы, отсканированы, описаны, из них должно быть извлечено как можно больше информации о кинематических и динамических параметрах взрывов, насколько это возможно. Поэтому было принято решение создать сейсмологический бюллетень Мирных ядерных взрывов.

Всего для создания цифрового сейсмологического бюллетеня мирных ядерных взрывов были обработаны 3201 сейсмограмма. На рисунке 10 показан процесс поиска сейсмограмм в архиве.



Рисунок 10. Поиск сейсмограмм в архиве.

Для каждой сейсмической станции, данные которых обрабатывались для создания бюллетеня, при помощи программы *distaz* рассчитаны эпицентральные расстояния. В качестве координат взрывов использовались уточнённые с помощью космоснимков и литературных данных, а также полевых выездов координаты взрывов [9-11]. Для интерпретации сейсмических фаз использовался годограф IASP91, замерялись времена вступления волн P_n , P_g , P , R_g (на вертикальных компонентах), S_n , L_g (на горизонтальных компонентах), амплитуды и периоды [12]. 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_R [13], а также магнитуда m_b с использованием калибровочной кривой Veith K.F., Clawson G.E. [14], региональная магнитуда m_{rv} с использованием калибровочной кривой Михайловой и Неверовой [15].

На данный момент сейсмологический бюллетень мирных ядерных взрывов содержит сведения о 107 взрывах с 1965 по 1988 гг. Для него были обработаны и сделаны все замеры для 3201 сейсмограммы, а все полученные данные включены в бюллетень.

Используя сейсмологический бюллетень, можно решать много актуальных задач. Для сейсмического мониторинга исследование зависимости магнитуд от мощности взрыва представляет большой интерес. В ходе работ по созданию сейсмического бюллетеня для мирных ядерных испытаний рассчитывались магнитуды m_{rv} , m_b , и энергетический класс K_R . Была выведена зависимость m_b от мощности взрыва:

$$m_b = 4.68 + 0.54 * \lg(Y(kt)), \text{ коэффициент корреляции } R = 0.65.$$

На рисунке 11 показано сравнение полученной нами зависимости от зависимости, полученной Кедровым О.К. [16]. По формуле Кедрова для взрывов с магнитудой больше 5, мощность взрывов несколько выше, чем по нашей формуле. Но поскольку МЯВ проводились в различных геологических условиях, наблюдается большой разброс данных. Поэтому были рассчитаны зависимости магнитуд m_b для ядерных взрывов, проведённых в

разной геологических условиях, от мощности взрыва. Для этого все мирные ядерные взрывы в СССР были разделены на четыре генетических типа пород в зависимости от состояния их кристаллизации: соли (кристаллические), осадочные породы (обломочные некристаллические), интрузивные породы (кристаллические), эффузивные породы (не полнокристаллические). Вычислены зависимости магнитуд и энергетических классов от мощности взрыва (Y) для МЯВ, проведённых в разных геологических средах. Видно, что сейсмический эффект взрывов существенно отличается в зависимости от среды – у ядерных взрывов в соли сейсмический эффект значительно выше, чем у проведённых в коренных породах.

Для подземных ядерных взрывов в соли:

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

Для подземных ядерных взрывов в коренных породах:

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

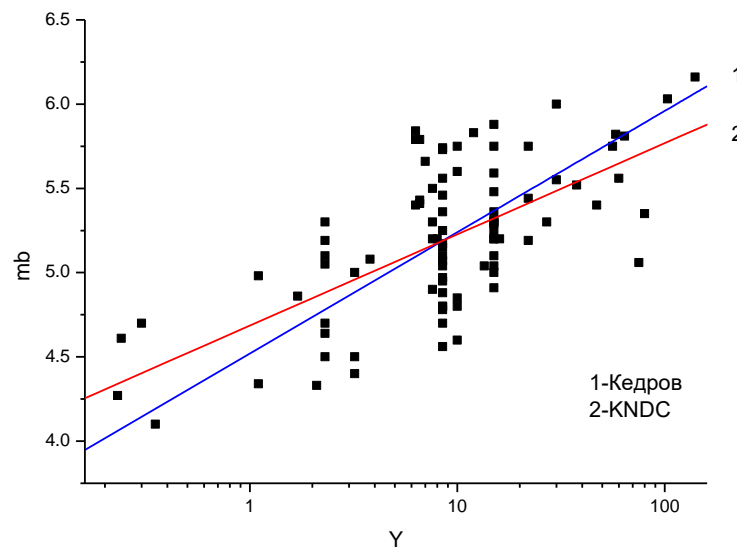


Рисунок 11. Зависимость между магнитудой m_b и Y для МЯВ.

Используя бюллетень МЯВ, был построен годограф для Восточно-Европейской платформы. Из сейсмического бюллетеня были выбраны замеры времён вступлений основных региональных фаз и рассчитаны времена пробега для выбранной территории.

Для построения годографа были добавлены замеры по 6 станциям (KJF, SOD, KEV, KIR, UME, NUR), взятые из ISC каталога, чтобы улучшить азимутальное окружение.

На рисунке 12 представлена карта с эпицентрами выбранных МЯВ и зарегистрировавших их станции при построении годографа для Восточно-Европейской платформы.

Годографы всех основных региональных типов волн строились с использованием линейного регрессионного анализа данных и рассчитывались так, чтобы достичь наилучшего приближения оцениваемой прямой линии к наблюдаемым значениям. На рисунке 13 представлены годографы основных типов волн для Восточно-Европейской платформы, в таблице 1 приведены уравнения годографов.

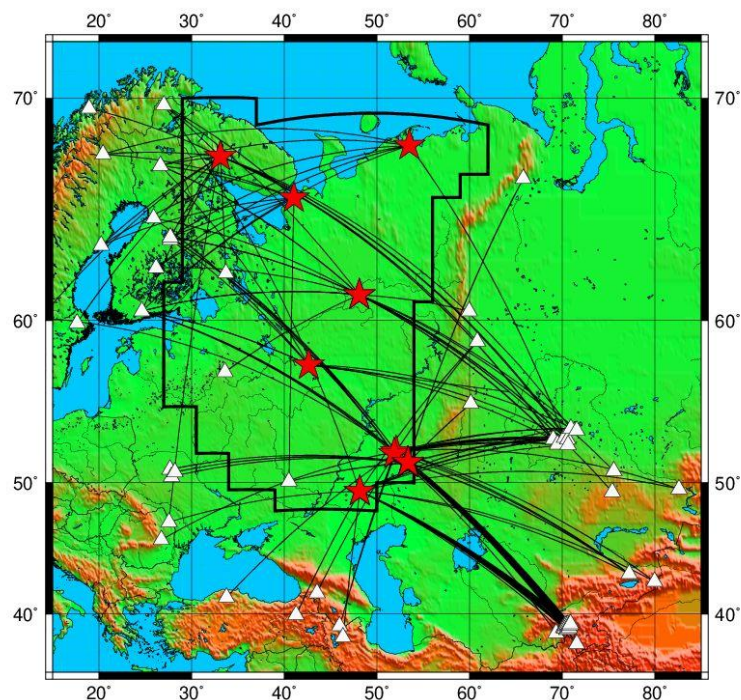


Рисунок 12. Карта расположения эпицентров МЯВ и системы наблюдений для построения годографа для Восточно-Европейской платформы. Звёздочка – МЯВ, треугольники – сейсмические станции, участвовавшие в обработке.

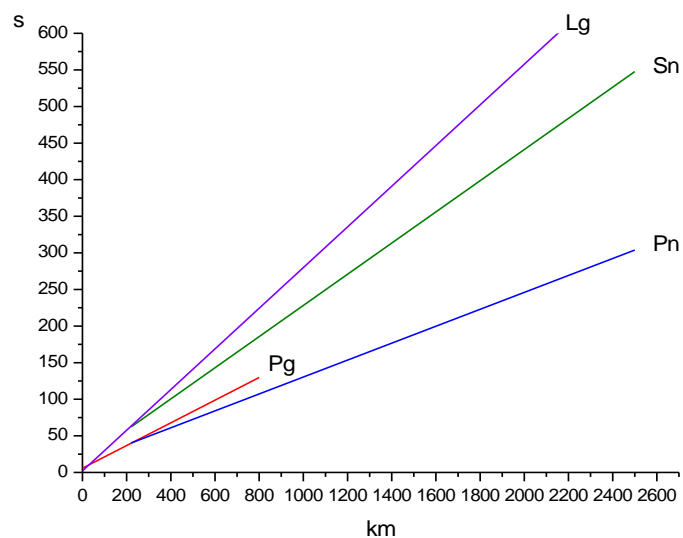


Рисунок 13. Годографы основных типов волн для Восточно-Европейской платформы.

Таблица 1. Уравнения основных фаз годографа для Восточно-Европейской платформы.

Фаза	Уравнение
Pn	$14.687+0,116*\Delta$
Pg	$5.813+0.155*\Delta$
Sn	$15.254+0.213*\Delta$
Lg	$2.186+0,278\Delta$

Заключение

1. В первую очередь для того, чтобы использовать в дальнейшем исторические сейсмограммы мирных ядерных взрывов для исследований, необходимо было создать базу данных по тем взрывам, по которым сохранились сейсмические записи их проявления на различных станциях, отличающихся расстоянием до источника взрыва, установленной на станциях аппаратурой, условиями регистрации и т.д. Результатом работы явилась база данных «Метаданные». База данных создана в двух вариантах (Excel и CSS 3.0) и включает информацию по 107 мирных взрыва, по 233 станциям.

2. Проведено уточнение параметров для ряда мирных взрывов, касающихся уточнения местоположения, дополнительного определения магнитуд и энергетических классов. Всего уточнение проведены для 21 взрыва (координаты) и 81 взрыва (магнитуды, классы).

3. Все уточнённые данные источников взрывов, а также определённые на основе обработки бумажных сейсмограмм характеристики – времена вступления региональных сейсмических волн, амплитуды и периоды - послужили основой для составления сейсмического бюллетеня. Составлен сейсмический бюллетень по 107 мирным ядерным взрывам.

4. Новая информация, обобщенная в сейсмических бюллетенях, использована для изучения скоростных свойств среды, построению годографов и скоростных моделей. Получены средние годографы для Восточно-Европейской платформы для разных типов волн. Изучена связь мощности взрывов с энергетическими характеристиками (магнитудами, классами).

Эта связь специфична для разных условий проведения взрывов. Получены соотношения для подземных взрывов в соли и в осадочных породах.

5. Архивные исторические сейсмограммы МЯВ сканировались и оцифровывались. Для оцифровки начато применение программного обеспечения WaveTrack, позволяющего проводить эту работу более качественно с большим разрешением. Всего оцифровано в рамках первого этапа работ 1074 сейсмограммы.

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования Министерства энергетики Республики Казахстан BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» НТП «Использование исторических аналоговых сейсмограмм ядерных взрывов и землетрясений из района Центральной Азии в задачах ядерного и сейсмического мониторинга» (шифр 04.05).

Литература

1. Электронный ресурс <http://ekimoff.ru/178/>
2. 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.
3. N.N Mikhailova., A.K. Kurskeev Present Status of the Network for Seismic Observation in Kazakhstan. // Journal of earthquake prediction research. - 1995. – v. 4, P. 497- 506.
4. Аранович З.И. и др. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР//М., Наука, 1974.
5. Васильев А. П., Горин Н. В. и др. Интегральная база данных о Мирных Ядерных взрывах на территории бывшего СССР/ — Вестник НЯЦ РК выпуск 2 июнь 2018 — стр. 58–61.

6. Непейна К.С., Ан В. А., Челюбеева Т. В. Мирные Ядерные испытания СССР, геофизическая обсерватория «Боровое». Вестник НЯЦ РК. 2019;(2):28-32. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-2-28-32>
7. K. G. Mackey, K. Fujita, A. Abishev, E. Bergman Improvement of gt classification of soviet PNEs/ Вестник НЯЦ РК выпуск 2 июнь 2016 — ст.123-126.
8. Васильев А. П., Дубасов Ю.В., Ильичёв В. А. и др. Ядерные взрывные технологии: Эксперименты и промышленные применения / — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017.— 507 с.
9. Абишев, А.Х. Инструментальное уточнение мест проведения мирных ядерных взрывов на территории Казахстана. / А.Х. Абишев, А. М. Яковенко, К.Г. Маккей // Вестник НЯЦ РК. 2016. Вып.4. С. 92–97.
10. Kevin Mackey and Kazuya Fujita. Improvement of GT Classification of Soviet PNEs. // Department of Geological Sciences Michigan University.P.69.
11. K. Mackey, Bergman E. Ground-Truth Locations for the Mangyshlak Peaceful Nuclear Explosion Sequence, Western Kazakhstan. // BSSA. Vol.104, No.4, pp.2116-2119.
12. Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г. Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500 км от эпицентра / В кн. Экспериментальная сейсмика. Труды ИФЗАН СССР // М: Наука, 1964. - С. 63–87
13. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях 3000 км. // Труды ИФЗ АН СССР. №32 (199), 1964г. с.72-98.
14. Veith K.F., Clawson G.E. Magnitude from short period P-wave data. - BSSA, 1972, 62, №2.
15. Михайлова Н. Н., Неверова Н. П. Калибровочная функция для определения магнитуды МРVA землетрясений Северного Тянь-Шаня. // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. Алма-Ата, Наука, 1986г., с.41-47.
16. Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Саранск, 2005 г., 419 стр., С. 242–251.

Рецензент: к. ф.-м. н. А. Г. Фролова