

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КАМБАРАТИНСКОГО ВЗРЫВА

А.И. Гончаров¹, В.И. Куликов¹, М.Б. Эткин², М.П. Камчыбеков³

¹Институт динамики геосфер РАН, ²Институт Гидроспецпроект,

³Институт сейсмологии НАН КР

Представлены результаты исследования сейсмического эффекта Камбаратинского взрыва. По сейсмограммам в ближней зоне взрыва определено фактическое время в очаге и интервал времени между взрывами первого и второго зарядов. Сопоставляются магнитуды взрыва по данным региональной сейсмической сети Киргизии MPVA и по данным Геофизической службы РАН. Обсуждается зависимость магнитуды промышленных взрывов от их мощности и погрешности сейсмических сетей в определении координат эпицентра взрыва и времени в очаге.

Введение

22 декабря 2009 г. был проведен крупномасштабный взрыв по созданию взрывонабросной плотины Камбаратинской ГЭС (рис. 1). Проект предусматривал обрушение правого борта каньона реки Нарын с помощью зарядов химических взрывчатых веществ, размещенных в двух минных штольнях. На рис. 2 в плане показано расположение зарядов (прямоугольники 1 и 2). Первый заряд, массой 700 тонн, был размещен в штольне длиной 104 м и имел ЛНС (кратчайшее расстояние до земной поверхности) 57 м. Второй заряд, массой 2150 тонн, был размещен в штольне длиной 50 м и имел ЛНС 104 м. Сначала подрывался первый заряд, спустя около 1,7 с – второй.



Рис. 1. Видеокадр Камбаратинского взрыва.

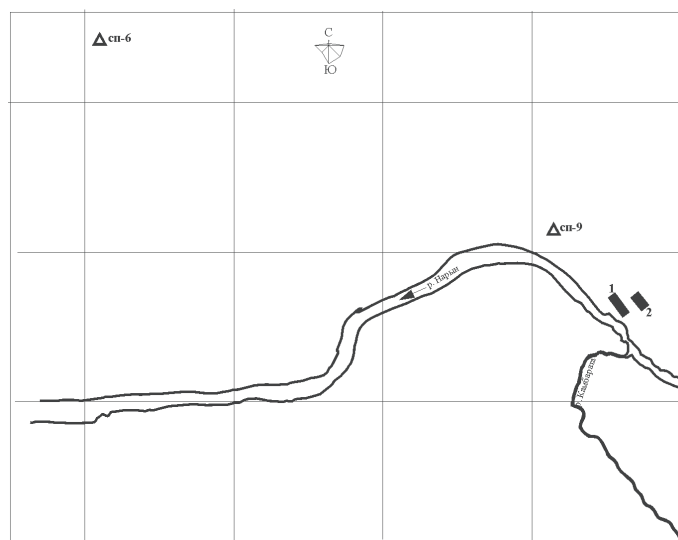


Рис. 2. План-схема размещения зарядов и сейсмопунктов.

Камбаратинский взрыв, благодаря своей мощности, явился неординарным сейсмическим событием, сопоставимым по сейсмическому эффекту с подземными ядерными взрывами и тектоническими землетрясениями. Как следует из бюллетеня срочных донесений Геофизической службы РАН, Камбаратинский взрыв был зарегистрирован, как единичное сейсмическое событие, 30-тью сейсмическими станциями мира. В табл. 1 приведен перечень этих станций, их кодовое название, время прихода P фазы на станцию, эпицентрального расстояния до очага, магнитуда m_b по объемным волнам и назван источник этих сведений. На рис. 3 показано расположение этих станций относительно эпицентра взрыва.

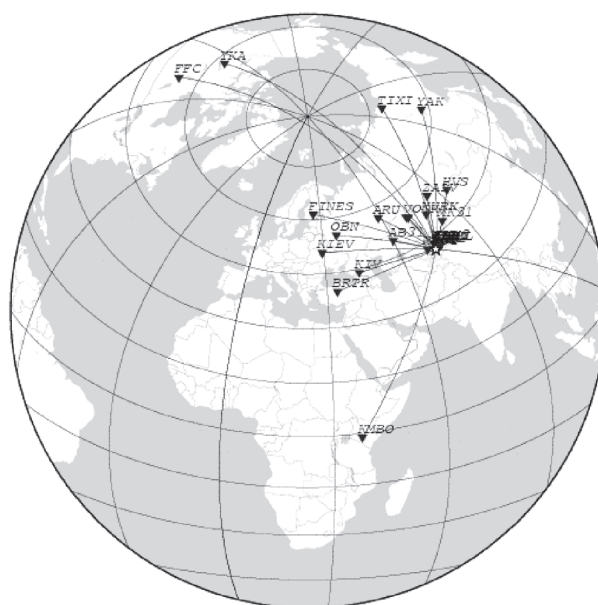


Рис. 3. Сейсмостанции, зарегистрировавшие взрыв.

Таблица 1

Бюллетень Геофизической службы РАН

N	COD	TIME	DELTA	AZIMUTH	RESIDUAL	MB	NET	SOURCE
1	AML	05:54:42.6	0,34	65	-1,8	–	KYRG	KYRG
2	EKS2	05:54:51.6	0,77	29	0,1	–	KYRG	KYRG
3	UCH	05:54:52.6	0,95	75	-1,9	–	KYRG	KYRG
4	AAK	05:54:56.6	1,11	54	-0,5	–	KYRG	OBN
5	KBK	05:55:01.9	1,41	61	0,1	–	KYRG	KYRG
6	KZA	05:55:01.5	1,47	86	-1,3	–	KYRG	KYRG
7	CHMS	05:55:03.8	1,49	47	0,7	–	KYRG	KYRG
8	USP	05:55:05.6	1,57	35	1,3	–	KYRG	KYRG
9	TKM2	05:55:11.3	1,95	61	0,9	–	KYRG	KYRG
10	ULHL	05:55:14.6	2,22	82	0,3	–	KYRG	KYRG
11	KK31	05:55:17.5	2,33	300	1,7	–	NNC	NNC
12	MK31	05:56:36.6	8,04	50	0,8	–	NNC	NNC
13	KURK	05:56:55.3	9,48	21	-0,4	5,4	NNC	NNC
14	VOSK	05:57:13.2	10,85	353	-1,4	–	NNC	NNC
15	BRVK	05:57:19.2	11,26	351	-0,9	5,9	NNC	OBN
16	AB31	05:57:25.5	11,82	312	-2,2	–	NNC	NNC
17	ZALV	05:58:01.0	14,22	29	1,4	–	IDC	IDC
18	HVS	05:58:32.2	16,72	50	0,3	–	ASRS	ASRS
19	ARU	05:58:40.1	17,30	332	0,9	4,8	OBN	OBN
20	KIV	05:59:36.3	22,41	285	0,1	4,9	OBN	OBN
21	OBN	06:00:22.2	27,27	311	-0,1	4,6	OBN	OBN
22	BRTR	06:00:45.1	29,88	279	-0,9	–	ISK	IDC
23	KIEV	06:00:57.0	31,24	301	-0,8	–	KIEV	KIEV
24	FINES	06:01:21.5	34,12	321	-1,3	–	HEL	IDC
25	YAK	06:02:01.5	38,55	39	1,3	5,3	YARS	OBN
26	TIXI	06:02:13.0	40,04	24	0,5	–	YARS	OBN
27	KMBO	06:04:02.2	53,86	227	0,4	–	NAI	IDC
28	YKA	06:06:22.0	75,68	4	-0,7	–	OTTR	IDC
29	WRA	06:07:06.8	83,49	124	1,3	–	CAN	IDC
30	FFC	06:07:07.2	83,58	357	1,9	–	OTT	OTT

Согласно бюллетеню ГС РАН время в очаге или время взрыва – 05:54:36,1 GMT, координаты эпицентра очага землетрясения (взрыва) N 41,99° и E 73,28°. Фактические координаты эпицентра взрыва (второго более мощного заряда), определенные нами по приемнику GPS – N 41,775° и E 73,334°. Погрешность данных Геофизической службы РАН составляет 24 км. Это допустимая погрешность, если учесть удаленность сейсмических станций от эпицентра взрыва.

Как и для любого землетрясения, для этого взрыва была определена глубина сейсмического источника, которая согласно бюллетеню равна 10 км (фактическая глубина 104 м). Эта цифра свидетельствует, что рассматриваемое «землетрясение» было мелкофокусным. Идентификация взрыва, особенно такой незначительной для сейсмологии мощности, сложная специальная задача, которая обычно не решается службой срочных донесений. Поэтому незначительная глубина фокуса этого «землетрясения» является в данном случае подсказкой, что источником мог быть взрыв.

Регистрация сеймовзрывной волны

Как видно из табл. 1, магнитуда взрыва была определена шестью сеймостанциями. Магнитуда определялась по амплитуде объемных волн. Среднее значение составило $m_b = 5,2$, разброс отдельных значений довольно велик, от величины 4,6 до 5,9.

Для контроля за сейсмическим действием Камбаратинского взрыва на регион строящейся ГЭС непосредственно перед взрывом на эпицентральных расстояниях до 4 км были размещены девять мобильных сеймопунктов для регистрации сильных движений. На двух из них – СП-6 и СП-9 – регистрация сеймовзрывной волны велась с привязкой к единому времени по приемникам GPS. Это позволило определить время в очаге с куда большей точностью, чем по данным Геофизической службы РАН. Рассмотрим эти результаты. На рис. 2 показано расположение сеймопунктов СП-6 и СП-9. Оба они находились на правом берегу Нарына. СП-9 находился на эпицентральных расстояниях 660 м от первого заряда и 750 м от второго. СП-6 находился на расстояниях 3970 и 4060 м от этих зарядов. Грунты в этих сеймопунктах были сухие песчано-глинистые. Предварительно были вырыты приямки глубиной около 1 м, в них была залита бетонная подушка, на которой устанавливались и закреплялись анкерными болтами акселерометры сильных движений ОСП-2.

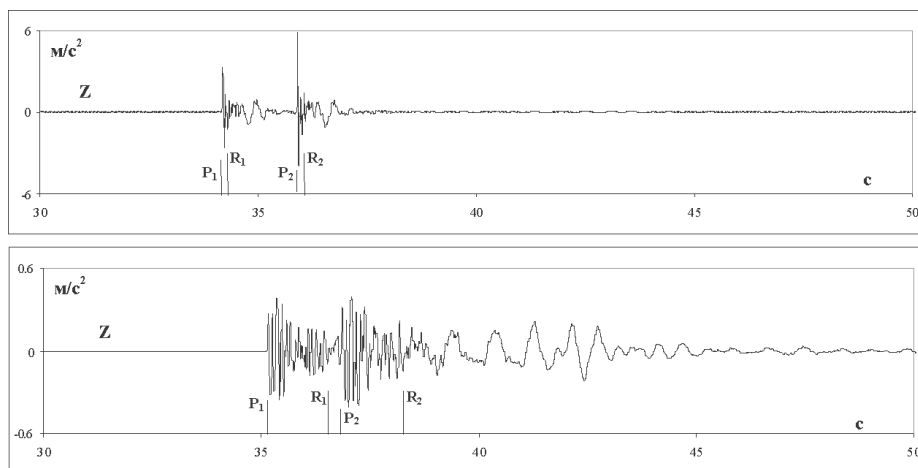


Рис. 4. Акселерограммы вертикальных колебаний в сеймопунктах СП-9 (вверху) и СП-6 (внизу).

На рис. 4 приведены вертикальные акселерограммы взрыва: вверху, зарегистрированная в СП-9, и внизу – в СП-6. Отсчет времени идет от 05:54:00 GMT. На акселерограммах маркерами Р и R с индексами 1 и 2 отмечены моменты прихода фаз объемных и поверхностных волн от каждого из зарядов. По этим данным на рис. 5 были построены годографы продольной и поверхностных волн, фазе Р-волн соответствуют кружки, фазе R-волн – квадраты, зачерненные значки – первому заряду, незачерненные – второму заряду. Через экспериментальные точки были проведены прямые линии, которым соответствуют скорость распространения продольной волны 3,43 км/с для первого заряда и 3,02 км/с – для второго, скорость распространения поверхностной волны 1,49 км/с для первого заряда и 1,45 км/с – для второго. Средние значения скоростей распространения продольных и поверхностных волн

$C_p = 3,23$ км/с и $C_R = 1,47$ км/с. Столь низкие значения скоростей распространения продольных и поверхностных волн объясняются тем, что, во-первых, заряды находятся на глубине около 100 м, и во-вторых, для таких эпицентральных расстояний сейсмические лучи проходят в приповерхностном слое коры.

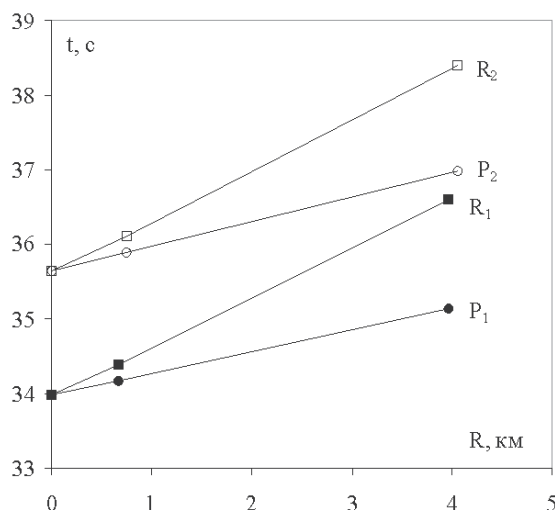


Рис. 5. Годографы продольных и поверхностных волн.

Экстраполяция годографов к оси ординат позволила получить моменты взрывов, которые приведены в табл. 2. Интервал времени между взрывами составлял 1,664 с. Из этих данных следует, что бюллетень Геофизической службы не идентифицирует Камбаратинский взрыв, как взрыв двух зарядов, и приводит время в очаге близкое по значению ко времени взрыва второго заряда. По-видимому, это объясняется тем, что на сейсмограммах фазы сейсмических волн от первого взрыва выделить не удалось.

Таблица 2

Данные очага по различным сейсмическим сетям

Параметры	Фактические значения		Киргизская сеть		ГС РАН
	1-ый заряд	2-ой заряд	1-ый заряд	2-ой заряд	
t_0 в очаге	05:54:33,977	05:54:35,641	05:54:33,18	05:54:35,44	05:54:36,1
Δt , сек	—	—	−0,797	−0,201	−2,92
N, град	41,7749	41,7751	41,776	41,769	41,99
E, град	73,3323	73,3337	73,326	73,336	73,28
Δr , км	—	—	0,536	0,704	24,3
H, км	0,104	0,057	2,67	7,19	10
MPVA	—	—	4,31	5,14	5,2

Камбаратинский взрыв был зарегистрирован сетью региональных сейсмостанций Киргизии. На рис. 6 показана карта с расположением этих сейсмостанций на территории Киргизии. Зачерненными треугольниками показаны 13 аналоговых сейсмостанций сети КИС, белыми треугольниками – 10 цифровых сейсмостанций сети KNET, серыми треугольниками – 9 цифровых станций KRNET, незачер-

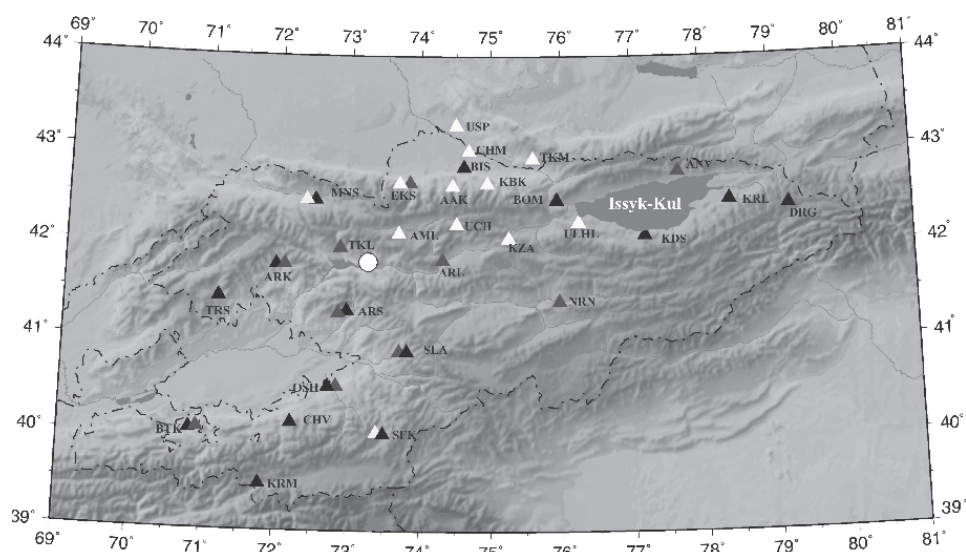


Рис. 6. Карта размещения сейсмостанций Киргизии и эпицентра взрыва (кружок).

ненный кружок – эпицентр взрыва. От Камбаратинской ГЭС эти сейсмостанции располагались на эпицентральных расстояниях от 50 до 374 км. На рис. 7 приведено несколько сейсмограмм вертикальных скоростей колебаний, полученных на цифровых станциях KNET, оснащенных сейсмоприемниками STS-2 и регистраторами Reftek. Сверху вниз приведены сейсмограммы станций AML (эпицентральное расстояние 57 км), UCH (120 км), USP (196 км), ULHL (256 км) и ANV

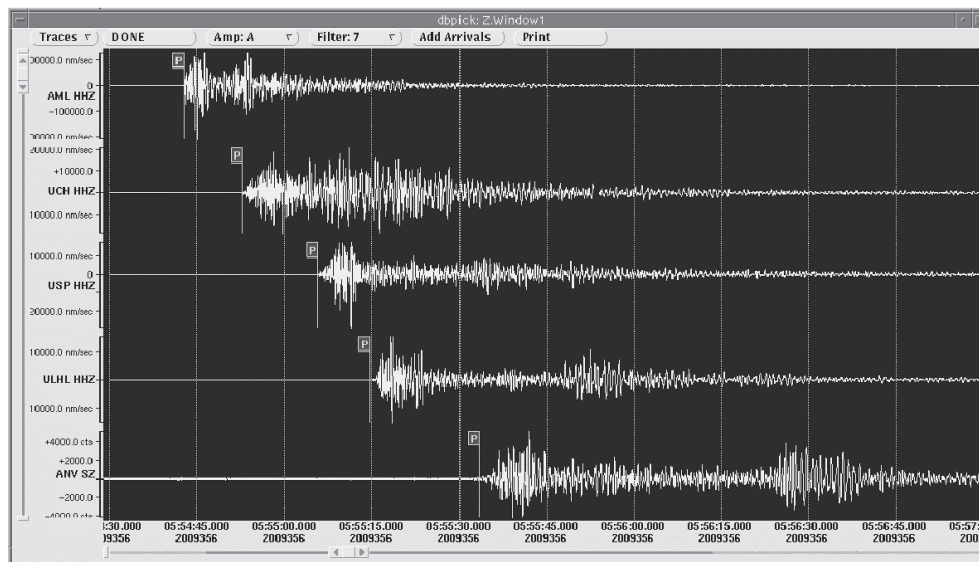


Рис. 7. Велосиграммы вертикальных сейсмических колебаний, зарегистрированные цифровыми станциями сети KNET.

(357 км). Маркерами Р отмечены моменты прихода Р-фазы от первого заряда. Благодаря тому, что был известен интервал времени между подрывом 1-ого и 2-ого зарядов, на сейсмограммах удалось идентифицировать моменты прихода Р- и S-фаз от первого и второго взрывов. По сейсмограммам цифровых станций были построены годографы Р- и S-фаз для обоих взрывов. В диапазоне расстояний 0–200 км скорость распространения продольной волны составила 6,21 км/с, поперечной – 3,60 км/с. Время в очаге первого и второго зарядов, определенное по годографам Киргизской сети, приведено в табл. 2. Мы приняли время в очаге, определенное по ближней зоне, за фактическое и оценили погрешности сейсмических сетей в определении времени в очаге Δt , которые приведены в табл. 2. Эти погрешности и, прежде всего их знак, объясняются тем, что расчетные годографы не учитывают того, что глубина источника (зарядов) составляла всего 104 м, где скорости распространения излученной сейсмической волны в 2 раза меньше скоростей распространения по годографу, экспериментально полученному по станциям KNET.

Сейсмостанции Киргизской сети определили магнитуды MPVA обоих взрывов по амплитуде продольных волн в соответствии с методикой обработки, разработанной Михайловой Н.Н. для расстояний от 20 до 1000 км [Михайлова, 1999]. На рис. 8 приведены эти магнитуды в зависимости от эпицентрального расстояния. Незачерненные кружки – для первого заряда и зачерненные – для второго. Среднее значение магнитуды для первого заряда $MPVA = 4,31$ (прерывистая прямая на рис. 8) и среднеквадратичное отклонение – 0,53 единицы магнитуды, для второго взрыва среднее значение магнитуды $MPVA = 5,14$ (сплошная прямая на рис. 8) и среднеквадратичное отклонение – 0,38. Отметим, что магнитуда взрывов, приведенных на рис. 8, в региональной зоне не зависит от расстояния, что свидетельствует об успешной идентификации фаз от обоих зарядов и достоверности калибровочной функции в методике Михайловой Н.Н. [Михайлова, 1999].

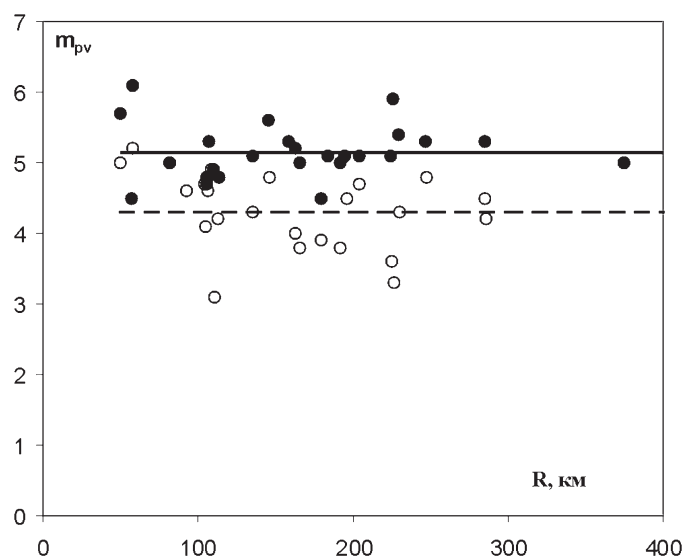


Рис. 8. Магнитуды первого (незачерненные кружки) и второго (зачерненные кружки) взрывов на различных эпицентральных расстояниях.

Магнитуда второго взрыва на 0,84 единицы больше, чем первого. Качественно это согласуется с тем, что масса (мощность) второго заряда в 3 раза больше первого. Магнитуда m_b по данным Геофизической службы РАН и магнитуда MPVA второго заряда по региональным данным Киргизской сети близки.

Магнитуда характеризует энергию сейсмического события в очаге. Это отражают корреляционные зависимости магнитуды от мощности взрыва (в тоннах ТНТ). В работе [Adushrin, 1990] приведена зависимость магнитуды объемных волн от мощности подземных ядерных взрывов, полученная по данным сейсмостанции Боровое (Казахстан):

$$m_b = 0,521 \cdot \lg q + 4,78, \quad (1)$$

где q – мощность ядерного взрыва в килотоннах ТНТ. Эта зависимость получена по данным взрывов мощностью от 1 до 20 кТ, проведенных на Невадском полигоне. На рис. 9 она представлена сплошной прямой.

В работе [Адушкин, 1996] приведены многочисленные данные о магнитудах промышленных химических взрывов. В результате их обобщения получена зависимость:

$$m_b = 1,34 \cdot \lg q + 3,78. \quad (2)$$

Эта зависимость представлена на рис. 9 прерывистой прямой.

Из рис. 9 видно, что ядерные взрывы по сейсмике более эффективны, чем химические. Возможно, это связано с разными условиями в очаге взрыва. Ядерные заряды обычно опускались на глубину 500 и более м в прочные вмещающие породы, и взрывы были камуфлетные, то есть без выхода энергии заряда (потерь энергии) в атмосферу, причем начальная концентрация энергии во взрывной полости на несколько порядков выше, чем при химических взрывах.

Кроме этих двух зависимостей, на рис. 9 кружками отложены магнитуды для 8-ми промышленных взрывов на выброс камерных зарядов, масштаб которых со-

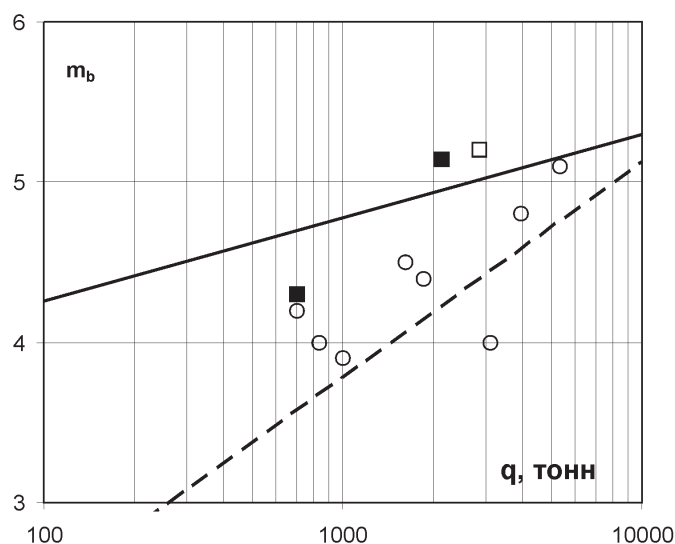


Рис. 9. Зависимость магнитуды взрывов от их мощности.

поставим с Камбаратинским взрывом. Основные сведения для этих взрывов приведены в табл. 3. Обратим внимание, что магнитуды этих 8-ми взрывов больше, чем по зависимости (2) для химических взрывов. Это объясняется тем, что при получении зависимости (2) авторы учитывали многочисленные карьерные взрывы, которые проводились по технологии короткозамедленного взрывания. По-видимому, химические взрывы камерных сосредоточенных зарядов и короткозамедленные массовые взрывы следует рассматривать отдельно.

Таблица 3

Магнитуды наиболее мощных промышленных взрывов

№	Место поведения	Дата взрыва	Мощность, тонн ТНТ	Магнитуда, m_b
1	Кабулсай	19.12.57	1000	3,9
2	Покровский	25.03.59	3100	4,0
3	Медео-1	21.10.66	5293	5,1
4	Медео-2	14.04.67	3941	4,8
5	Байпаза	29.03.68	1854	4,4
6	Бурлыкя	08.02.75	702	4,2
7	Тырныауз	31.12.77	833	4,0
8	Уч-Терек	11.06.89	1623	4,5

На рис. 9 также нанесено значение магнитуды $m_b = 5,2$ для Камбаратинского взрыва (незачерненный квадрат) по данным ГС РАН. За величину мощности взрыва была принята суммарная величина двух рядов – 2850 тонн. Зачерненные квадраты соответствуют магнитудам m_{pv} Киргизской сети для первого и второго зарядов. Из рис. 9 видно, что по магнитуде Камбаратинский взрыв «ближе» к ядерным взрывам, чем к химическим. Из сравнения с химическими взрывами также видно, что сейсмическая эффективность Камбаратинского взрыва больше, чем у приведенных в таблице 8-ми промышленных взрывов. Отсюда можно заключить, что по сейсмическому эффекту Камбаратинскому взрыву соответствует масса ВВ не меньше, чем была заложена в минных штольнях, и что детонация ВВ была полной и энергия продуктов детонации соответствовала проектной массе ВВ.

Основные результаты работы приведены в табл. 2. Это время в очаге t_0 , отклонение времени в очаге от фактического значения Δt , координаты N и E эпицентров взрывов согласно данным сейсмических сетей, отклонение эпицентров от фактического значения Δr и глубина гипоцентра очага (заряда) – Н. Эти данные показывают погрешности работы сейсмических служб. Поэтому материалы, полученные при регистрации сейсмики от Камбаратинского взрыва, могут служить для дальнейшего совершенствования методов обработки сейсмических наблюдений.

Заключение

По данным Геофизической службы РАН магнитуда Камбаратинского взрыва по объемным волнам составляет $m_b = 5,2$. Взрыв идентифицирован, как взрыв одного заряда.

Региональные станции Киргизии идентифицировали взрыв двух зарядов с магнитудой MPVA первого заряда 4,3 и второго – 5,13.

Получены погрешности сейсмических сетей по определению эпицентра взрыва и времени в очаге.

По сейсмическому эффекту детонация ВВ была полной и энергия продуктов детонации соответствовала массе ВВ.

Литература

Адушкин В.В., Спивак А.А. Крупномасштабные химически взрывы и проблема контроля подземных ядерных взрывов // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений: информационно-аналитический бюллетень. 1996, № 1, с. 107–117.

Михайлова Н.Н., Неверова Н.П., Калмыкова Н.А. Энергетические и магнитудные характеристики землетрясений в практике сейсмических наблюдений на северном Тянь-Шане. кн. Землетрясения в Северной Евразии. М.: Природа. 1999, с. 60–64.

Adushkin V.V., An V.A. Teleseismic monitoring of Underground Nuclear Explosions at the Nevada test Site from Borovoye, Kazakhstan // Science and Global Security, 1990. V. 3, No. 2, pp. 289–309.