

## СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ КАМБАРАТИНСКОГО ВЗРЫВА

*В.И. Куликов<sup>1</sup>, М.Б. Эткин<sup>2</sup>, М.П. Камчыбеков<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер РАН, <sup>2</sup>Институт Гидроспецпроект,

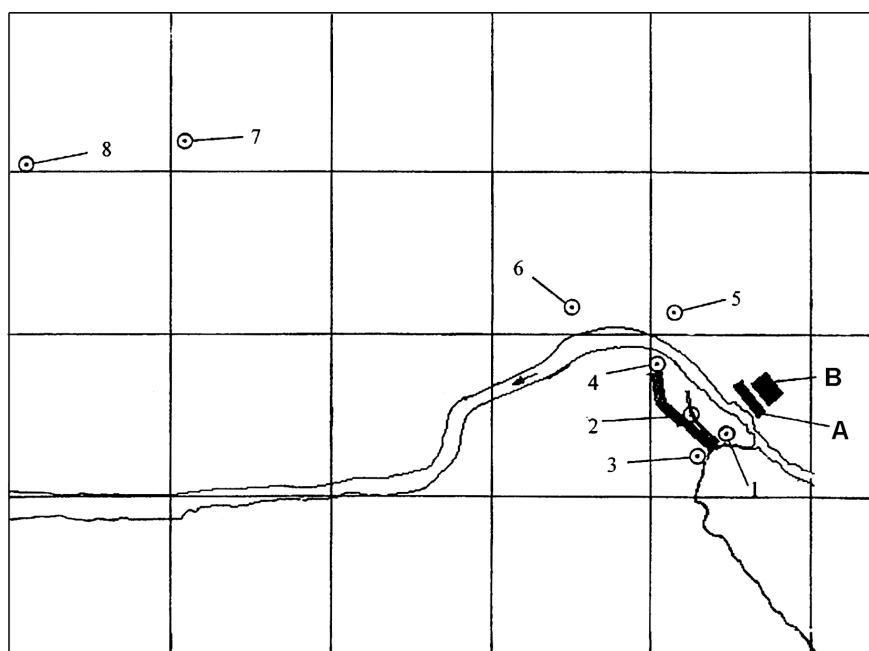
<sup>3</sup>Институт сейсмологии НАН КР

Представлены результаты регистрации сеймовзрывных волн Камбаратинского взрыва на эпицентральных расстояниях от 400 м до 50 км. По этим данным определено затухание сеймовзрывных волн и построены изосейсты интенсивности сейсмического действия взрыва на промышленные сооружения и застройку региона. Инженерное обследование этих объектов после взрыва показало, что при взрыве была обеспечена сейсмическая безопасность охраняемых сооружений.

### Введение

22 декабря 2009 г. в Кыргызской республике был осуществлен крупномасштабный Камбаратинский взрыв. Его целью являлось создание взрывонабросной гравитационной плотины Камбаратинской ГЭС-2 на р. Нарын. Проект, разработанный Институтом Гидроспецпроект, предусматривал (см. рис. 1) обрушение правого

борта каньона р. Нарын с помощью взрыва зарядов, размещенных в двух минных штольнях. На рис. 1 показано расположение штолен в плане (черные прямоугольники *A* и *B*). Заряд *A* массой 753 т был размещен в штольне длиной 110 м и имел ЛНС (расстояние до свободной поверхности) 60 м. Заряд *B* массой 2235 т был размещен в штольне длиной 50 м и имел ЛНС 105 м. Минные штольни были пройдены в сильно трещиноватом массиве пород, представленных свитой пластов песчаников и алевролитов с коэффициентом крепости по Протоdjяконову  $f=7\div8$ . В соответствии с проектом сначала подрывался первый заряд *A*, спустя 1,7 с – второй *B*.



**Рис. 1.** План-схема размещения зарядов (черные прямоугольники) и сейсмопунктов (светлые кружки). Сетка километровая.

Сейсмопункты размещены: 1 – на входном портале СЭВ (на эпицентральных 360 м от первого заряда и 450 м от второго заряда); 2 – в СЭВе, в середине его протяженности (на эпицентральных расстояниях 400 и 510 м от первого и второго зарядов); 3 – на бетонной опоре скального откоса над входными порталами водоводов (на эпицентральных расстояниях 480 и 570 м от зарядов); 4 – на фундаменте здания ГЭС (на эпицентральных расстояниях 600 и 690 м от зарядов); 5 – на грунтовой площадке на правом берегу Нарына (на эпицентральных расстояниях 680 и 740 м от зарядов); 6 – на кладбище (на эпицентральных расстояниях 1490 и 1550 м от зарядов); 7 – на восточной окраине поселка Каражигач, у жилых двухэтажных кирпичных домов (на эпицентральных расстояниях 4010 и 4060 м от зарядов); 8 – на заасфальтированной площадке территории школы (на эпицентральных расстояниях 4810 м от второго заряда)

Составной частью программы работ по осуществлению проекта Камбаратинского взрыва были комплексные инструментальные наблюдения, которые включали видеорегистрацию развития взрыва, регистрацию сеймовзрывных волн, наблюдения за сеймовзрывным действием на сооружения и застройку региона, регистрацию воздушной волны, анализ взрыва как регионального сейсмического события, исследования распространения пыле-газового облака и др. Необходимость мониторинга была обусловлена несколькими причинами. Во-первых, по мощности, он был неординарным промышленным взрывом, сопоставимым по сейсмиче-

скому эффекту с подземными ядерными взрывами и тектоническими землетрясениями. Во-вторых, взрыв проводился в сейсмически активном регионе. Согласно карте сейсмического районирования территории Кыргызстана регион строительства ГЭС относится к 9-ти балльной зоне сейсмичности.

### **Сеймовзрывные волны в ближней зоне взрыва**

Сейсмическое воздействие массовых взрывов на сооружения и застройку района, примыкающего к месту размещения зарядов, является неизбежной негативной стороной взрывной технологии. При Камбаратинском взрыве область интенсивного воздействия (относимого к рискам сейсмической опасности) охватывала весь комплекс основных и вспомогательных объектов ГЭС. Поэтому основные сооружения ГЭС: строительно-эксплуатационный водосброс (СЭВ), турбинные водоводы, участки затвора и бортов водоприемника, здание ГЭС, расположенные от взрывных камер на расстоянии 430–700 м, являлись объектами сейсмического контроля.

В состав охраняемых объектов, подлежавших сейсмическому контролю, были включены также кладбище пос. Каражигач на расстоянии 1400–1500 м и застройка пос. Каражигач на расстоянии 4–6 км от зарядных камер. Так как сейсмическое действие зависит не только от параметров взрыва, но и от свойств грунтов в основании сооружений и от их инженерно-технического состояния, то определение фактических параметров сейсмического действия на охраняемые сооружения являлось важной задачей мониторинга.

Для решения указанных задач было оборудовано девять пунктов регистрации, расположение которых можно видеть на план-схеме на рис. 1 (круглые значки): Сеймопункт 9 находился на расстоянии 48,7 км. Это была стационарная сеймостанция Кыргызской сейсмической сети.

В качестве сеймоприемников на сеймопунктах 1, 5, 6 и 7 были установлены акселерометры ОСП-2 с полосой частот регистрации от 0,3 до 100 Гц. На сеймопунктах 2, 3 и 4 были установлены акселерометры СМГ-5Т с полосой частот регистрации до 100 Гц, на сеймопунктах: 8 использовались велосиметры СМ-3КВ с полосой 0,5–40 Гц; 9 – велосиметры STS-2 с полосой 0,1–100 Гц. В каждом сеймопункте размещалось по три сеймоприемника. Один из них регистрировал вертикальные колебания, два других – горизонтальные, радиальные и тангенциальные колебания. На сеймопунктах на левом берегу акселерометры крепились анкерами к существующим бетонным площадкам сооружений, которые были сооружены на выходах скальных грунтов. Все сеймопункты на правом берегу размещались на наносах мягких грунтов, поэтому в нем были вырыты приямки глубиной около 1 м, дно которых было забетонировано. Затем на бетонной подушке анкерами были закреплены акселерометры. Сигналы с сеймоприемников поступали на вход АЦП с частотой оцифровки 1 кГц и затем записывались ноутбуками.

Для иллюстрации на рисунках 2–5 приведены акселерограммы вертикальных колебаний, зарегистрированные в сеймопунктах 1, 6, 7 и 9, и рассчитанные по ним велосиграммы, сеймограммы колебаний (время на сеймограммах указано в секундах, ноль времени на рисунках условный). Из рисунков 3–5 видно, что на сеймограммах зарегистрированы две сеймовзрывные волны. Интервал времени между вступлениями этих волн составляет 1,7 с, что соответствует интервалу времени между подрывами зарядов. Амплитуда колебаний во второй волне больше, чем в первой, что объясняется различием масс зарядов.

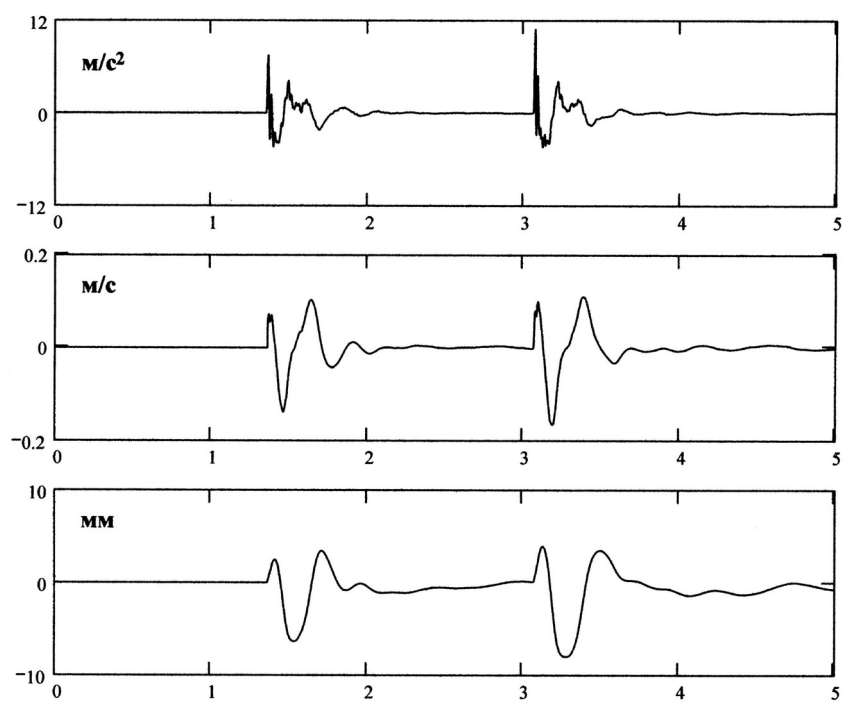


Рис. 2. Акселерограмма, велосиграмма и сейсмограмма на сеймопункте 1

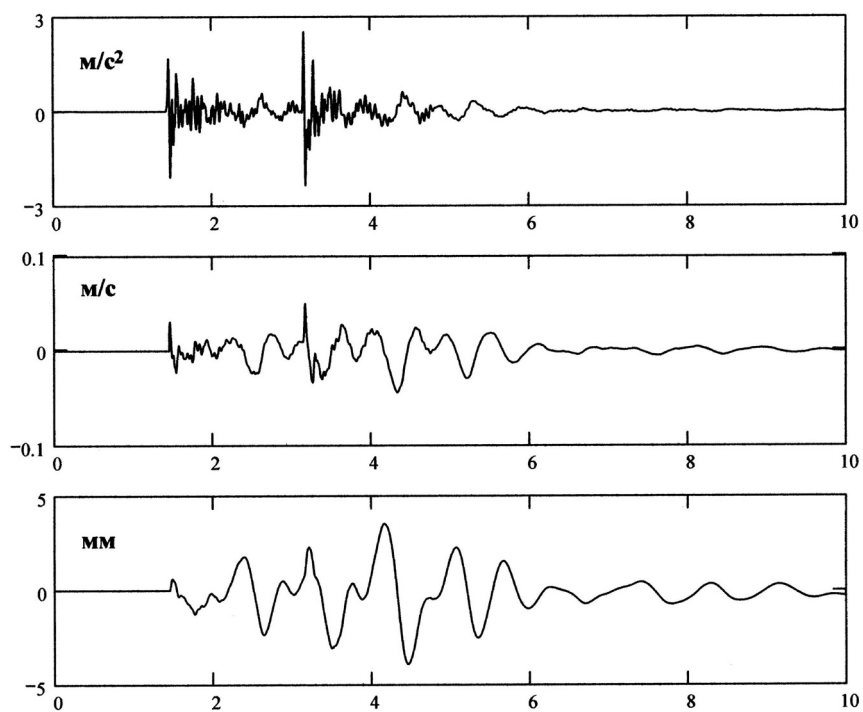


Рис. 3. Акселерограмма, велосиграмма и сейсмограмма на сеймопункте 6

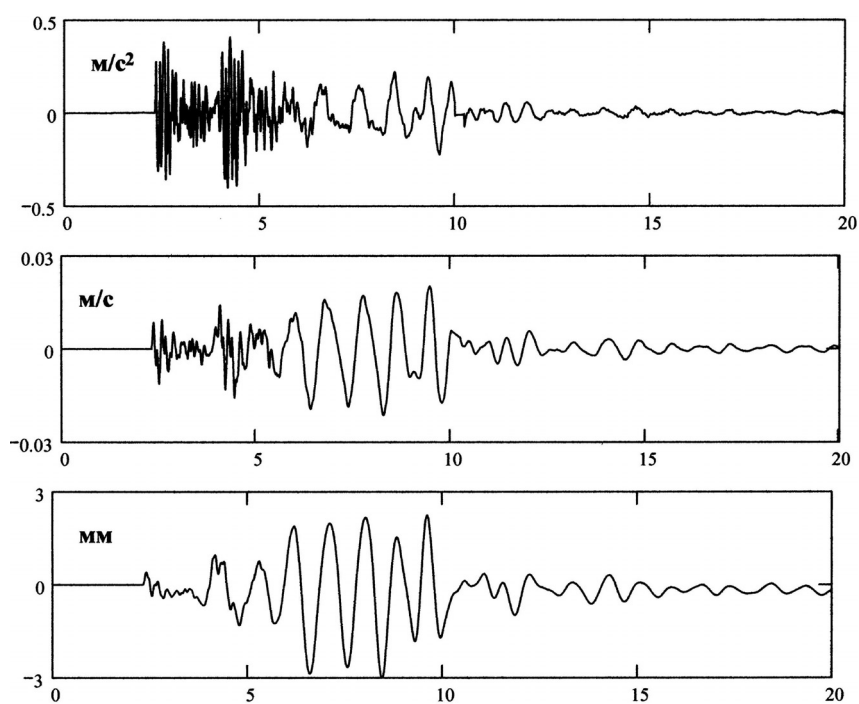


Рис. 4. Акселерограмма, велосиграмма и сейсмограмма на сеймопункте 7

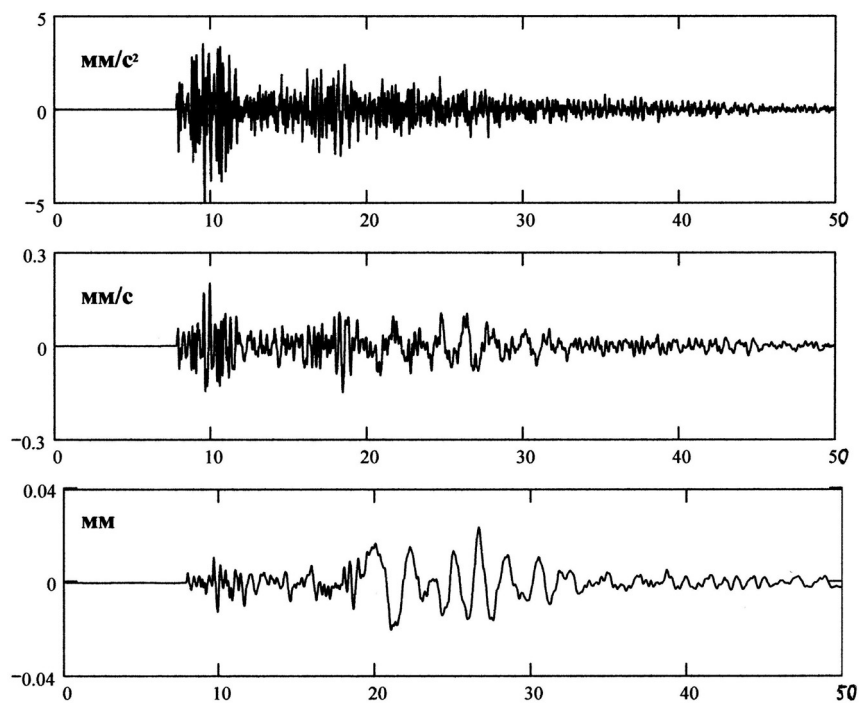


Рис. 5. Акселерограмма, велосиграмма и сейсмограмма на сеймопункте 9

На сейсмограммах можно выделить продольные, поперечные и поверхностные волны. Из-за их расхождения, связанного с различными скоростями распространения этих волн, продолжительность колебаний увеличивается. Частота колебаний наоборот уменьшается с расстоянием, пройденным волной, что связано с зависимостью затухания от частоты. Спектральный анализ велосиграмм показал, что в сейсмопункте 1 частота колебаний составляет около 2 Гц, а в сейсмопункте 7 – около 1,2 Гц. Отметим, что на расстояниях менее 5 км максимальные ускорения и скорости достигаются в продольных волнах, максимальные смещения приурочены к поверхностной волне.

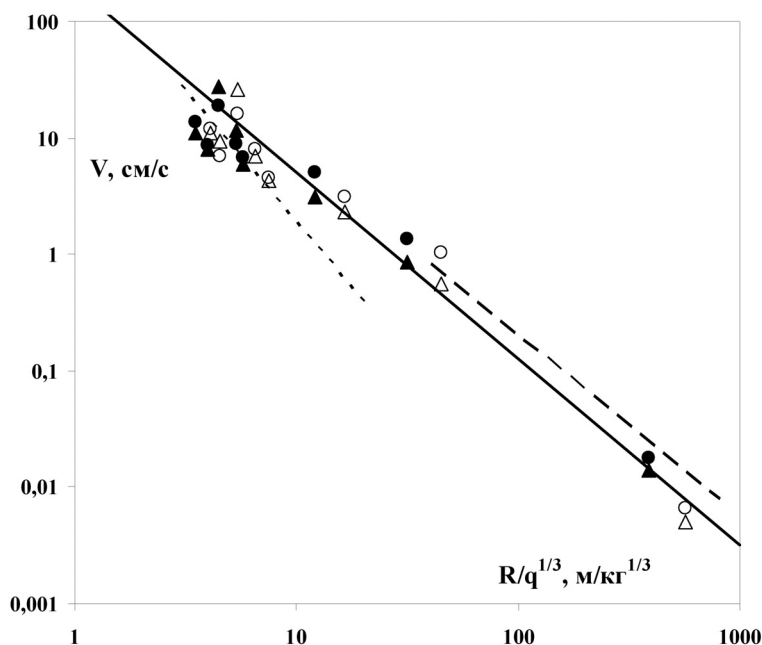
В качестве обобщения зарегистрированных параметров сеймовзрывных волн на рисунках 6, 7 и 8 построены зависимости максимальных ускорений, скоростей и смещений от приведенного (по корню кубическому из массы заряда) эпицентрального расстояния. Эти зависимости описываются формулами:

$$A = 100 \cdot \left( \frac{q^{1/3}}{R} \right)^{1,6} \text{ м/с}^2 \quad (1)$$

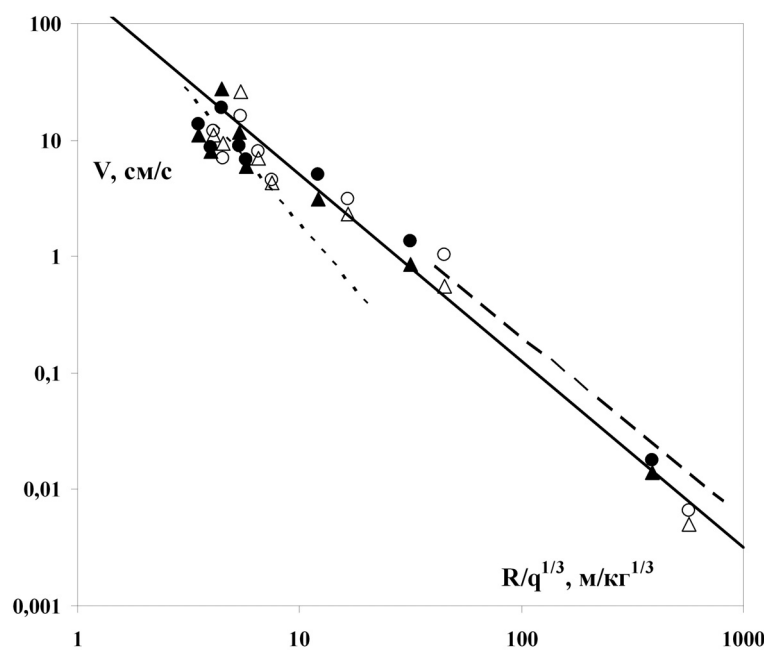
$$V = 200 \cdot \left( \frac{q^{1/3}}{R} \right)^{1,6} \text{ см/с} \quad (2)$$

$$W = 1,5 \cdot \left( \frac{q^{1/3}}{R} \right)^{0,6} \text{ см} \quad (3)$$

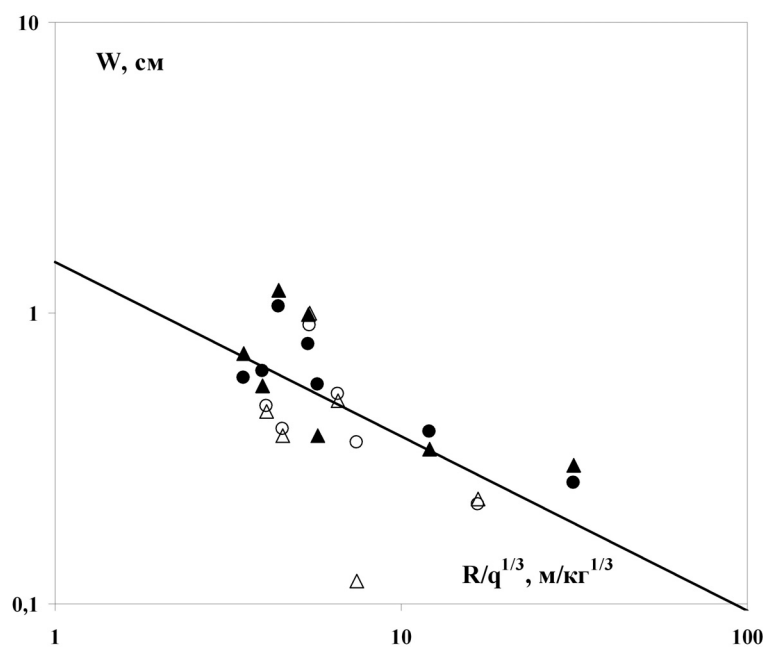
где  $q$  – масса зарядов в кг,  $R$  – эпицентрального расстояние в м.



**Рис. 6.** Зависимость максимального ускорения от приведенного эпицентрального расстояния. Первый заряд (незачерненные значки), второй заряд (зачерненные), вертикальные колебания (кружки), горизонтальные колебания (треугольники)



**Рис. 7.** Зависимость максимальной скорости колебаний от приведенного эпицентрального расстояния. Камбарата (сплошная прямая), р. Уч-Терек (прерывистая линия), р. Бурлыкья (точечная линия).  
Обозначения те же, что на рис. 6



**Рис. 8.** Зависимость максимальных смещений от приведенного эпицентрального расстояния. Обозначения те же, что на рис. 6

Однако многочисленные исследования сейсмозрывных волн от зарядов с массой от нескольких грамм до нескольких тонн показали, что сейсмический эффект лучше характеризовать зависимостью максимальной скорости колебаний от приведенного эпицентрального расстояния [Цейтлин, Смолий, 1981]:

$$V = K \cdot \left( \frac{q^{1/3}}{R} \right)^n \text{ см/с} \quad (4)$$

Коэффициент  $K$  в этой формуле получил название коэффициента сейсмичности. Его величина зависит от физико-механических свойств горной породы (прочности, естественной трещиноватости, влажности и т.д.) и условий взрывания (зажатая среда, число обнаженных поверхностей, качество забойки заряда и т.д.). Для прочных горных пород типа гранита и мрамора коэффициент сейсмичности достигает величины около 400 и более, для слабых песчаников и аллювия 100 и менее [Цейтлин, Смолий, 1981]. Для карьерных короткозамедленных взрывов в кварците коэффициент сейсмичности равен 200 [Гончаров, Куликов, Минеев, Седоченко, 2006]. Степень  $n$  определяет затухание волны с расстоянием. Значения  $n$  варьируются в нешироких пределах. Для диапазона скоростей колебаний от 10 до 0,01 см/с  $n$  имеет значение около 1,5 [Цейтлин, Смолий, 1981]. Из формулы (2) следует, что для Камбаратинского взрыва коэффициент сейсмичности  $K$  и степень затухания  $n$  близки к аналогичным данным для мелкомасштабных взрывов и короткозамедленных карьерных взрывов.

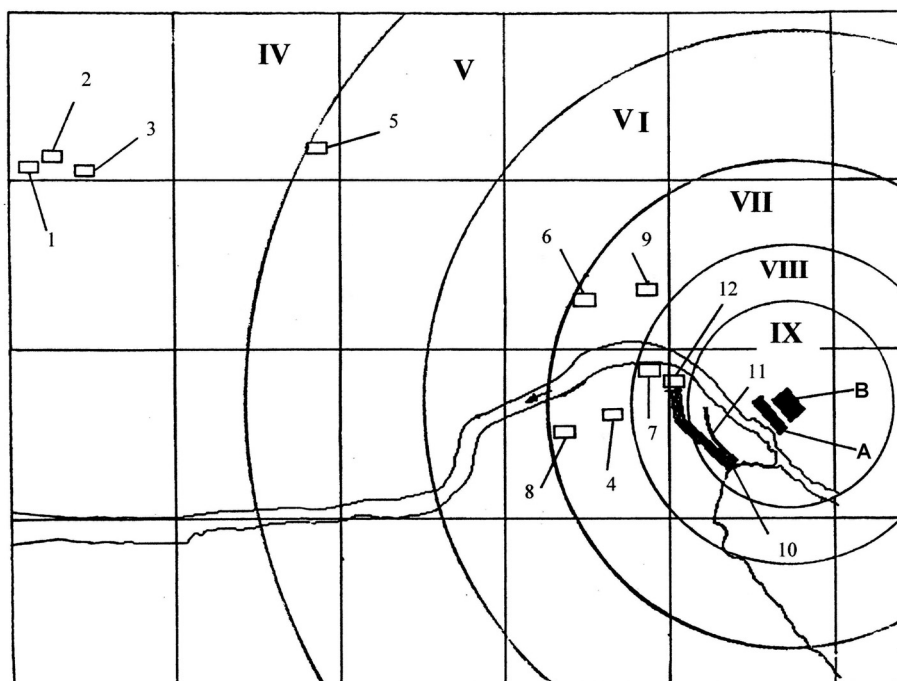
На рис. 7 также приведены зависимости максимальной скорости колебаний от приведенного эпицентрального расстояния для сопоставимых по мощности крупномасштабных взрывов на р. Уч-Терек мощностью 1623 т (тротилловый эквивалент взрыва) [Куликов, Султанов, 1990] и на р. Бурлык мощностью 703 т [Адушкин, Фомичев, Кондратьев и др., 1977]. В целом, можно считать, что амплитуды сейсмозрывных волн Камбаратинского взрыва близки к амплитудам, зарегистрированным при взрывах на реках Бурлык и Уч-Терек. Большого согласия не следует ожидать, так как горные породы, вмещающие заряды при этих взрывах, существенно отличаются. Отметим, что при Камбаратинском взрыве сейсмозрывные волны были зарегистрированы на большом интервале расстояний и могут быть рекомендованы для прогноза параметров сейсмозрывных волн при проектировании крупномасштабных взрывов.

### Интенсивность сейсмического действия взрыва

Естественно, что сейсмические волны от столь мощного сейсмического источника могли вызвать повреждения промышленных сооружений, жилых и административных зданий, находящихся в регионе производства взрыва. Для определения последствий сейсмического действия взрыва на этих объектах до (за 2–3 дня до взрыва) и после взрыва (через 1–2 дня после взрыва) был проведен инженерный анализ состояния сооружений. Работа выполнялась в соответствии с методикой ЦНИИСК [Методические рекомендации..., 1980].

Расположение объектов инженерного анализа показано на план-схеме региона (рис. 9). В таблице 2 указаны назначение объектов, их этажность, материал, из которого они возведены, тип сооружения (в соответствии с классификацией по шкале MSK-64 [Медведев, 1962]) и эпицентрального расстояния объектов от второго заряда. При выборе этих объектов учитывалась их представительность в общей за-

стройке населенных пунктов региона, различие в конструктивном решении зданий и строительных материалах.



**Рис. 9.** План-схема региона и зоны различной балльности. Заряды (зачерненные прямоугольники), объекты (незачерненные прямоугольники), изосейсты – окружности, IV–VIII – баллы

Специально для инженерного анализа на зданиях и сооружениях в местах сопряжения элементов и других проблемных местах конструкции устанавливались гипсовые маяки (рис. 10). Степень повреждения объектов определялась в соответствии с классификацией повреждений согласно сейсмической шкале MSK-64 [Медведев, 1962].

Так как не на всех объектах велась регистрация сейсмических колебаний, амплитуды сейсмических нагрузок на объекты (максимальные ускорения, скорости и смещения) определялись по полученным зависимостям (1)–(3) и их значения приведены в таблице 1. Если теперь сопоставить эти амплитуды с инструментальной частью шкалы MSK-64, то интенсивности колебаний, определенные по ускорениям, скоростям и смещениям, будут отличаться на 2–3 балла. Но в MSK-64 ускорения даны для периодов от 0,1 до 0,5 с, скорости для периодов от 0,5 до 2,0 с, а смещения для маятника с периодом колебаний 0,25 с и логарифмическим декрементом затухания 0,5. Для Камбаратинского взрыва на эпицентральных расстояниях от 400 м до 5 км характерная частота колебаний в сеймовзрывных волнах изменялась от 2,5 до 1,3 Гц, поэтому интенсивность колебаний была определена по максимальной скорости горизонтальных колебаний объектов. Полученные по скоростям колебаний значения интенсивности на каждом объекте приведены в последнем столбце таблицы 1.



**Рис. 10.** Объект 4 (столовая Нарынгэстроя).  
Гипсовые маяки (белые полосы)

*Таблица 1*

**Объекты инженерного обследования**

| №   | Назначение объекта  | Высота объекта | Материал строения                        | Тип сооружения | Эпиз. расст., м | Амплитуды горизонтальных колебаний |                   |                 | Балл |
|-----|---------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|-----------------|------------------------------------|-------------------|-----------------|------|
|     |                     |                |                                          |                |                 | $A, \text{ м/с}^2$                 | $V, \text{ см/с}$ | $W, \text{ мм}$ |      |
| 1   | Школа               | 2 этажа        | кирпич                                   | Б              | 4810            | 0,31                               | 0,61              | 1,7             | IV   |
| 2   | Медпункт            | 2 этажа        | кирпич и сейсмопояс                      | Б              | 4790            | 0,31                               | 0,62              | 1,7             | IV   |
| 3   | Жилой дом           | 1 этаж         | глинобитный                              | А              | 4512            | 0,34                               | 0,68              | 1,8             | IV   |
| 4   | Столовая            | 1 этаж         | кирпич                                   | Б              | 1060            | 3,4                                | 6,9               | 4,2             | VII  |
| 5   | Жилой дом           | 1 этаж         | кирпич/<br>глинобитный                   | А              | 3550            | 0,5                                | 0,99              | 2,05            | IV   |
| 6   | Памятник            | 5 м            | кирпич-сырец                             | А              | 1450            | 2,1                                | 4,2               | 3,5             | VII  |
| 7   | Админ. здание ГЭС   | 3 этажа        | каркас железобетон, заполнитель – кирпич | В              | 740             | 6,1                                | 12,2              | 5,3             | VIII |
| 8   | Гидромонтаж         | 1 этаж         | кирпич                                   | Б              | 1315            | 2,4                                | 4,9               | 3,7             | VII  |
| 9   | Дом чабана          | 1 этаж         | кирпич                                   | Б              | 1080            | 3,3                                | 6,7               | 4,2             | VII  |
| 10* | Входной портал СЭВа | –              | железобетон                              | В              | 450             | 13,6                               | 27                | 7,1             | IX   |
| 11* | СЭВ                 | –              | железобетон                              | В              | 510             | 11                                 | 22                | 6,6             | IX   |
| 12* | ГЭС                 | –              | железобетон                              | В              | 690             | 6,8                                | 13,7              | 5,5             | VIII |

\* – особо ответственные сооружения.

В таблице 2 приведены скорости колебаний для каждого балла интенсивности шкалы MSK-64. Для этих скоростей по зависимости (2) для второго более мощного заряда были рассчитаны эпицентральные расстояния  $R$ , на которых эти скорости достигаются. Полученные значения  $R$  приведены в таблице 2. Их можно считать радиусами изосейст по инструментальным данным. Эти изосейсты построены на план-схеме региона на рис. 9.

Таблица 2

**Параметры сейсмических колебаний  
при различной интенсивности**

| Балл                     | V   | VI    | VII   | VIII   | IX      | X       |
|--------------------------|-----|-------|-------|--------|---------|---------|
| Скорость колебаний, см/с | 1–2 | 2,1–4 | 4,1–8 | 8,1–16 | 16,1–32 | 31,2–64 |
| Радиус изосейсты, км     | 3,3 | 2,2   | 1,46  | 0,96   | 0,62    | 0,4     |

Из таблицы 1 и рис. 9 видно, что согласно инструментальным данным значительное количество охраняемых производственных объектов оказалось в зонах с интенсивностью колебаний VII, VIII и IX баллов. Массовая застройка поселка Каражигач оказалась в IV балльной зоне действия взрыва.

Приведем ниже результаты инженерного обследования охраняемых объектов. Общественно значимые и жилые объекты 1, 2, 3 находились в IV балльной зоне и там повреждений быть не должно. Это согласуется с результатами инженерного обследования. После взрыва все маяки оказались неповрежденными, дефектов кирпичной кладки стен не обнаружено. На объекте 5, сооружении типа А, интенсивность колебаний по инструментальным данным V баллов и можно было ожидать повреждения 1 степени. Однако инженерное обследование не выявило повреждений. На объекте 6, сооружении типа А, интенсивность колебаний по инструментальным данным VI баллов и можно было ожидать повреждения 2 степени. Однако инженерное обследование не выявило повреждений. На объекте 7, сооружении типа В, интенсивность колебаний по инструментальным данным VIII баллов и можно было ожидать повреждения 2 и даже 3 степени. Однако инженерное обследование не выявило повреждений. На объектах 4, 8 и 9, сооружениях типа Б, интенсивность колебаний по инструментальным данным VII баллов и можно было ожидать повреждения 2 степени. Однако инженерное обследование не выявило повреждений.

Особо ответственные сейсмостойкие железобетонные сооружения ГЭС 10, 11 и 12, находились в зоне с интенсивностью колебаний по инструментальным данным VIII баллов. Однако инженерное обследование не выявило повреждений. Сразу после взрыва СЭВ и машинный зал ГЭС были готовы к эксплуатации. Особо выделим объект 11 – СЭВ. Его длина – 300 м, диаметр сечения – 11 м. До настоящего времени инженерная сейсмология не сталкивалась с примерами сейсмического воздействия взрывов на горные выработки столь большого сечения.

Таким образом, обследование объектов показало, что интенсивность сейсмического действия, определенная по инструментальным данным, явно завышена. Отсутствие повреждений в объектах 1–12 означает, что при одинаковых амплитудах сейсмических волн интенсивность сейсмического действия Камбаратинского взрыва на сооружения на один-два балла ниже, чем землетрясений.

Менее сильное сейсмическое действие взрывов по сравнению с землетрясениями отмечалось и ранее. Сравнение сейсмического действия горных взрывов и зем-

летрясений на массовую застройку привело С.В. Медведева к созданию сейсмической шкалы для промышленных взрывов, в которой при одинаковой балльности амплитуды сейсмической волны в 1,5 раза выше, чем в шкале для землетрясений [Медведев, 1964]. Этому соответствует понижение балльности воздействия взрывов на 0,5 балла. Эту корректировку шкалы С.В. Медведев объяснял тем, что спектр сейсмозрывных волн более высокочастотный, чем спектр сейсмических волн землетрясений. Но в случае Камбаратинского взрыва в спектре сейсмозрывной волны доминируют частоты от 1 до 2,5 Гц, то есть практически такие же, как в сейсмических волнах от землетрясений. Поэтому отсутствие повреждений в сооружениях в регионе ГЭС, по-видимому, связано с другой особенностью сейсмозрывной волны – с существенно меньшей продолжительностью колебаний. Как видно из сейсмограмм на рисунках 2–5, продолжительность колебаний в сейсмозрывной волне на охраняемых объектах составляла несколько секунд, то есть на 1-2 порядка меньше продолжительности колебаний при землетрясениях.

### **Заключение**

Эмпирические коэффициент сейсмичности и степень затухания для Камбаратинского взрыва близки по значениям к аналогичным параметрам для мелкомаштабных и короткозамедленных взрывов.

Интенсивность сейсмического действия Камбаратинского взрыва на особо ответственные сооружения ГЭС, определенная по скорости колебаний, составляла VIII баллов, что на один балл меньше, чем это возможно в этом регионе при землетрясениях (согласно карте сейсмического районирования для Кыргызстана).

При Камбаратинском взрыве была обеспечена сейсмическая безопасность всех охраняемых сооружений ГЭС и региона. Реальная интенсивность колебаний была меньше, чем определенная по скоростям колебаний. Это объясняется незначительной продолжительностью колебаний (несколько секунд) в сейсмозрывной волне.

### **Литература**

*Цейтлин Я.И., Смолий Н.И.* Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. Недра, 1981. 192 с.

*Гончаров А.И., Куликов В.И., Минеев В.И., Седоченко В.В.* Сейсмическое действие массовых взрывов на подземных и открытых работах // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: Сб. научн тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2006, с. 22–33.

*Куликов В.И., Султанов Д.Д.* Сейсмическое действие взрыва на р. Уч-Терек // Энергетическое строительство, 1990, № 6, с. 21–24.

*Адушкин В.В., Фомичев А.Г., Кондратьев С.В. и др.* Инструментальные наблюдения механического и сейсмического действия взрыва на р. Бурлыкя // Гидротехническое строительство, 1977, № 5, с. 32–35.

*Методические рекомендации по инженерному анализу последствий землетрясений.* Изд. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1980, 76 с.

*Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. Стройиздат. 1962.

*Медведев С.В.* Сейсмика горных взрывов. Недра. 1964.