

# ШКАЛЫ И МЕТОДЫ В МАКРОСЕЙСМИКЕ

УДК 550.34

## РАЗВИТИЕ ШКАЛ ТИПА MSK

Н.В. ШЕБАЛИН, Ф.Ф. АПТИКАЕВ

Объединенный институт физики Земли Российской академии наук, Москва

Проведен сравнительный анализ шкал сейсмической интенсивности MSK-64 и EMS-98. Обнаружен ряд недостатков принципиального характера, присущих обеим шкалам. Предлагается шкала нового поколения MMSK-92, свободная от этих недостатков. В частности, приводится корреляция сейсмической интенсивности с пиковыми амплитудами ускорений, скоростей и смещений грунта. Оценено влияние продолжительности колебаний на сейсмическую интенсивность.

## DEVELOPMENT OF MSK SCALES

N.V. SHEBALIN, F.F. APTIKAEV

United Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow

A comparative analysis of the MSK-64 and EMS-98 intensity scales has been carried out. Several drawbacks common to both scales have been detected. We suggest a new generation scale MMSK-92 that is free from these drawbacks. In particular, we provide correlation of seismic intensity to peak ground acceleration, velocity and displacement. The effect of ground motion duration on seismic intensity is estimated.

## Введение

Шкала MSK-64 [Медведев, 1968] появилась более 35 лет назад. Она получила широкое распространение в Европе и ряде стран Азии, в частности, она используется в отечественных СНиП [СНиП..., 2000]. Практика показала, что наряду с очевидными достоинствами шкала MSK-64 имеет и существенные недостатки:

- ограниченность классов объектов, в том числе ограниченность типов зданий, используемых в шкале;
- использование краевой, а не более устойчивой средней части распределения объектов по степеням реакции;
- применение нечетких словесных характеристик статистических распределений реакции объектов (“отдельные” – около 5%; “многие” – около 50%; “большинство” – около 75% от общего числа объектов в выборке), затрудняющих оценку в промежуточных ситуациях;
- неравномерность перехода от степени повреждений к интенсивности в зоне 6–8 баллов;
- неопределенность относительно использования инструментальных характеристик для оценки сейсмической интенсивности;
- несоответствие инструментальных оценок, характеризующих интенсивность, фактическому материалу;
- отсутствие возможности оценки интенсивности по сейсмологическим параметрам.

Попытки усовершенствования шкалы делались неоднократно как в нашей стране, так и за рубежом [Аптикаев, 1972; Ершов, 1982; Мартемьянов, Ширин, 1982; Медведев, 1978; Сейсмическая..., 1975; Шебалин, 1975a; Grunthal, 1998; Medvedev, 1977; Minutes..., 1990; Report..., 1980; Sponheuer, Bormann, 1981; Thoughts..., 1989]. Во исполнение резолюции Европейской Сейсмологической Комиссии 1978 года была создана в ЕСК Специальная Группа по макросейсмической шкале. Однако, на наш взгляд, группе не удалось решить ни одной серьезной проблемы, связанной с модификацией шкалы MSK-64, за исключением более удачной редакции текста для интенсивности 1–3 балла. Это тем более досадно, что многими участниками был высказан ряд весьма важных предложений для решения этих проблем. В итоге в разработанной Специальной Группой шкале [Grunthal, 1998], получившей название EMS (European Macroseismic Scale), сохранилось большинство недостатков, присущих шкале MSK-64.

Остановимся на основных недостатках макросейсмической шкалы EMS. Основным, решающим недостатком всей работы является несбалансированный подход к компонентам шкалы. Если типизация зданий явилась предметом внимательного рассмотрения, то одинокие призывы вспомнить о резолюции 1978 года и заняться изучением полных распределений числа объектов (зданий) по всем степеням повреждений от 0 (без повреждений) до 5 (полный обвал здания) остались без внимания, и группа без конца дискутировала смысл и содержание весьма рыхлых понятий – “отдельные”, “многие”, “большинство”. Статистику признаков предлагалось заменить статистикой встречаемости в индивидуальных

описаниях сведений о реакции “отдельных”, “многих” или “большинства” объектов [Grunthal, 1998; Minutes..., 1990]. Не случайно грубые, но хотя бы четкие оценки С.В. Медведева – 5%, 20% и 55% – были заменены перекрывающимися интервалами 0%–20%, 10%–60% и 50%–100%, что, как легко показать, при определенных “раскладах” может вызвать ошибку до 1.5 балла. На этапе 1990 года группа отказалась и от сопоставления описательных характеристик с сейсмометрическими данными, считая это компетенцией инженеров [Minutes..., 1990]. Между тем, инструментальная шкала сейсмической интенсивности наряду со шкалой степеней реакции объектов на сейсмические воздействия, уравнением макросейсмического поля и площадями, оконтуриваемыми изосейстами, позволяют оценить равномерность сейсмической шкалы [Ершов, 1982]. Пока нет уверенности, что шкала сейсмической интенсивности является именно шкалой интервалов, невозможно ее использование для расчета приращений при микрорайонировании, в расчетах сотрясаемости и т.д. В шкалах порядка недопустимы арифметические операции с получаемыми оценками, операции их осреднения, сравнения приращений и т.п., а в шкалах интервалов все указанные операции возможны [Пфанцагель, 1976; Супес, Зинес, 1967]. К сожалению, на это обстоятельство в большинстве случаев не обращается никакого внимания. Мы провели такие исследования и установили, что, с достаточной для практических целей точностью, можно считать шкалу сейсмической интенсивности внутренне равномерной и тем самым относить ее не к более низкому рангу шкал порядка, а к более высокому рангу шкал интервалов.

В проекте новой шкалы (1990 г.) Специальной Группой было решено:

1. Образовать шкалу из системы модулей: основного (на базе модифицированной шкалы MSK), инженерного (для оценки интенсивности по объектам современного сейсмостойкого проектирования), исторического (для оценки интенсивности исторических землетрясений), сейсмогеологического.
2. Ввести в состав шкалы пояснительную часть с фотографиями типичных эффектов землетрясений.
3. Исключить для оценки интенсивности объекты специального назначения (большие мосты, плотины, АЭС, сверхвысокие здания), при оценке интенсивности отдать предпочтение использованию эффектов на обычных зданиях.
4. Исключить проблемы соотношения интенсивности с параметрами сильных движений в ближней зоне, считая это прерогативой Подкомиссии ЕСК по инженерной сейсмологии.
5. Принять уточненную классификацию зданий.
6. Принять новую редакцию текста для интенсивности 1–3 балла.

По поводу этих предложений можно заметить следующее:

1. Система модулей нелогична: с одной стороны, исторические землетрясения обособлены очень четко и введение в шкалу блока для оценки их интенсивности целесообразно; с другой стороны, в большинстве случаев при обследовании современных землетрясений приходится иметь дело с перемежающейся застройкой, где в одинаковых условиях встречаются и “обычные” (не рассчитанные специально на сейсмостойкость) здания, и сейсмостойкие постройки. Разнесение их по разным модулям сможет привести лишь к затруднениям в оценке балльности, тем более, что “инженерный” блок, основанный на предложениях Х.Тидеманна, построен по иной логике, чем основной, что в принципе недопустимо.

2. Введение в шкалу пояснений в виде альбома фотографий, по существу, возвращает ее к блаженным временам оценок по “типичным” повреждениям, когда шкала перестает быть шкалой. Предпочтительнее было бы создание под руководством Комиссии отдельного, не интегрированного со шкалой методического пособия или руководства по практической оценке интенсивности.

3. Объекты специального назначения не могут быть исключены из шкалы, поскольку никем никогда в нее не включались. Принцип предпочтительности обычных зданий, разумеется, очень важен.

4. Исключение параметров сильных движений нецелесообразно хотя бы по причинам, о которых говорилось ранее. Кроме того, совместное рассмотрение инструментальных и макросейсмических данных позволяет правильно оценить факторы, определяющие сейсмический эффект. Вместо исключения данных было бы целесообразнее включить в Группу представителей Подкомиссии ЕСК по инженерной сейсмологии.

5. Наши данные, а также данные Н. Амбрезиса и многих других, убедительно показывают необходимость разделения зданий группы А на две группы.

6. Уточнение формулировок для интенсивности 1–3 балла целесообразно.

7. Совершенно удивительно, что Специальная Группа проигнорировала предложение многих участников работы ввести нулевую степень повреждений.

Авторы настоящей работы сделали попытку устранить недостатки, присущие шкалам MSK и EMS. Принципиальная схема и методические основы макросейсмической шкалы нового поколения были разработаны Ф.Ф. Аптикаевым, И.А. Ершовым, Н.В. Шебалиным [Аптикаев, 1972; Ершов, 1982; Ершов, Шебалин, 1984; Пфанцагль, 1976; Супес, Зинес, 1967; Шебалин, 1975а, 1975б]. Эти принципы в основном сохраняют силу и при построении предлагаемой шкалы. Вариант шкалы но-

вой конструкции был использован при обследовании последствий многих землетрясений. В частности, при обследовании последствий Спитакского землетрясения 1988 года сейсмологи, имевшие существенно различные предварительные оценки сейсмической интенсивности, в результате применения новой шкалы получили одинаковые конечные результаты. Это говорит о том, что строгое применение новой шкалы минимизирует субъективный фактор. С учетом отечественного опыта и результатов работы Специальной Группы ЕСК авторами данной работы составлен окончательный вариант шкалы, получивший название MMSK-92 (модифицированная шкала MSK, версия 1992 г.).

Основные принципы построения новой шкалы:

- стремление создать шкалу балльности как шкалу интервалов;
- использование прямой оценки интенсивности по статистике реакции многих объектов различных типов без введения каких-либо поправок на местные условия и т.п.;
- строгое соответствие интервалов (границ) баллов шкал MSK-64 и MMSK-92;
- возможно большее расширение класса объектов, реагирующих на землетрясение, с оценкой их реакции в форме, допускающей статистическую обработку;
- переход к полному распределению числа изучаемых объектов по всем степеням их возможной реакции (вместо использования ограниченной статистики части объектов с наибольшими степенями реакции в шкале MSK-64) с дальнейшим использованием средней степени реакции каждого типа объектов;
- введение понятий порога чувствительности и насыщения реакции различных объектов при установлении перехода от средней степени реакции к балльности;
- установление приоритетов различных объектов в зависимости от интенсивности;
- введение строгих правил осреднения при несовпадающих оценках балльности по объектам разного вида;
- исследование и обновление корреляционных соотношений между уровнем макросейсмического эффекта и количественными характеристиками колебаний грунта, в том числе параметрами остаточных смещений;
- введение рациональной приближенной оценки интенсивности землетрясений по дистанционным сейсмологическим данным;
- уточнение корреляции с другими шкалами;
- существенное упрощение и сокращение шкалы по форме.

Остановимся подробнее на описании объектов различных видов. Предлагается обозначать: предметы быта – индексом П, людей – индексом Л, инженерные сооружения – индексом И. Для сохранения преемственности для зданий сохраним индексы, принятые в шкале MSK-64, добавив индексы для сейсмостойких зданий и сооружений.

## Виды объектов, используемые в шкале

### Здания

Предлагаются следующие изменения: детализация, частичные изменения типа и некоторые дополнения для обычных (несейсмостойких) зданий; некоторые уточнения в шкале повреждений, в частности – упоминание о допустимых видах ремонтных работ, как это было предложено, в частности, в сборнике [Сейсмическая..., 1975].

Разделение типа А на два новых: А1 (местные здания из некачественного материала) и А2 (местные здания удовлетворительного качества) – обосновано в работе [Шебалин, 1975б].

Отнесение к типу Б местных зданий с хорошим деревянным каркасом, а также часто встречающихся типовых кирпичных сооружений (стенки, трансформаторные будки, силосные башни). Речь идет именно о типовых, простых железобетонных и кирпичных сооружениях. Специально спроектированные особые сооружения – большие мосты, плотины, очень высокие трубы и башни и т.п. – использовать при оценке балльности не следует.

Перевод крупнопанельных зданий в тип В, предложенный в работе [Сейсмическая..., 1975], обоснован материалами обследований нескольких сильных землетрясений последних лет [Газлийское..., 1982; Мартемьянов, Ширин, 1988; Ципенюк, 1988 и др.]. Также отнесены к типу В типовые железобетонные сооружения – башни, маяки, стенки и др.

Деревянные щитовые дома в разных вариантах шкал типа MSK относят то к типу Б, то к типу В [Мартемьянов, Ширин, 1988]. Учитывая большую гибкость этих зданий и, как следствие, серьезные повреждения печей и обвалы штукатурки при достаточно сильных колебаниях, по уровню опасности эти дома следовало бы выделить в особый тип [Поляков и др., 1982], в области слабых воздействий близкий к В, в области сильных воздействий – к типу Б. Если учесть, что первые встречаются значительно чаще вторых, в данном варианте решено отнести их к типу В.

При использовании зданий типов Б и В возникает вопрос о допустимости оценки по высоким кирпичным, панельным и каркасным зданиям (9–14 этажей). Мнения по этому вопросу противоречивы. Распро-

странено мнение, что степень повреждений плавно возрастает к верхним этажам. Однако по нашим наблюдениям и литературным данным [Prochazkova, Shenkova, 1981] такие здания при землетрясениях чаще всего колеблются не по первой форме и наибольшие усилия могут наблюдаться и на промежуточных этажах. Кроме того, достаточно часты случаи наибольших повреждений именно на первом этаже (например, в несущих колоннах). Представляется, что в отличие от предложения из работы [Minutes..., 1990] следует продолжать учитывать повреждения по общему правилу – лишь на первых этажах.

В соответствии со СНиП сейсмостойкие здания должны сохранять конструктивную несущую способность при землетрясении расчетной интенсивности. Таким образом, реакция  $r$  зданий различной сейсмостойкости на сейсмические воздействия может быть дифференцированной, и это дает возможность использовать реакцию сейсмостойких зданий в качестве признаков шкалы [Баранников и др., 1970; Гарагозов и др., 1985; Ершов, Попова, 1985; Bottari et al., 1985; Kenjebaev, 1989; Prochazkova, Shenkova, 1981; Velkov, 1989]. Некоторые исследователи проводят классификацию сейсмостойких зданий и по расчетной балльности и по типу здания (кирпичное, крупнопанельное, каркасное), что дает девять типов сейсмостойких зданий [Bottari et al., 1985; Kenjebaev, 1989]. Единообразный подход к устойчивости зданий разного типа при расчетной сейсмичности позволяет надеяться, что в основу классификации можно положить не тип здания, а заложенный в нем уровень сейсмостойкости, т.е. использовать разбиение сейсмостойких зданий, независимо от материала и конструкции, всего на три типа в зависимости от их расчетной сейсмостойкости – С7, С8, С9. Для зданий, не описанных в шкале, оценку их сейсмостойкости могут давать проектировщики на основании произведенных расчетов, испытаний с помощью виброплатформ, вибромашин, взрывов на испытательных полигонах и инженерного анализа последствий землетрясений.

### Предметы быта

Использование реакции предметов быта  $r_{\text{п}}$  в качестве признаков интенсивности всегда было темой острых дискуссий. В ряде работ (напр., в [Сейсмическая..., 1975]), всякая возможность применения признаков такого рода категорически отрицается. Однако подробные исследования [Баранников и др., 1970; Гарагозов и др., 1985; Ершов, 1982; Ершов, Шебалин, 1984; Ершов, Попова, 1985; Шебалин, 1975а] доказали возможность и целесообразность использования этого класса объектов. Основная трудность при работе с этими признаками состояла в построении достаточно определенной шкалы степеней реакции, ибо предметы быта

являются наиболее простыми и, в определенном смысле, монолитными объектами, вследствие чего число их возможных состояний при механических воздействиях невелико. Помимо двух очевидных предельных состояний (отсутствие реакции, сильная реакция – предмет падает) авторам удалось выделить промежуточное состояние – слабую реакцию. Введен еще один тип предметов быта – свободно висящие П1 (лампы на длинном шнуре, занавески и т.п.). Для определенности предлагается пользоваться оценкой реакции предметов, находящихся в момент землетрясения на первом и цокольном этажах зданий.

### Люди

Инструментальные данные фиксируют развитие сейсмического движения грунта во времени. Менее точна привязка ко времени процесса психологического и физиологического воздействия сейсмических колебаний на человека. Грубо говоря, человек запоминает не землетрясение, а свою реакцию на него. Все остальные объекты “запоминают”, естественно, лишь остаточные явления. Систематизация данных о степени реакции людей  $r_d$  основана на большом материале наблюдений. В данной редакции вслед за работой [Ершов, Шебалин, 1984] мы считаем целесообразным отказаться от чрезмерной детализации наиболее сильных степеней реакции с целью повышения равномерности шкалы. Для определенности следует пользоваться оценкой реакции только тех людей, которые в момент землетрясения находились на первом или цокольном этажах зданий.

С другой стороны, коль скоро шкала используется и для прогноза последствий землетрясений [Аптикаев и др., 1997], целесообразно использовать такие важные характеристики, как количество раненых  $N_p$  и убитых  $N_y$  в процентах от общего числа жителей [Аптикаев, 2000; Аптикаев et al., 1997]. Увеличение объема исходных данных за счет увеличения срока наблюдений (с 1946 года включительно) практически не изменило полученные ранее оценки

$$\lg N_p, \% = 0.6I + C \pm 0.4,$$

где величина константы зависит от преобладающего типа застройки. По мировым данным для городов, где преобладают здания типа Б, В и С7, константа  $C = -5$ . Если в населенном пункте преобладают постройки типа А, то  $C = -3.2$ . В России преобладают постройки типа Б, В и С7, откуда

$$I = 1.7 \lg N_p, \% + 8.3 \pm 0.7,$$

рабочий диапазон реакции 8 – 10 баллов.



Аналогичное соотношение для количества убитых имеет вид:

$$\lg N_y, \% = I - C \pm 0.4,$$

где для зданий типа А константа  $C = -7.4$ , а для типичной городской застройки  $C = -9.2$ .

Для условий России можно принять:

$$I = \lg N_y, \% + 9.2 \pm 0.7,$$

рабочий диапазон реакции 8 – 10 баллов.

Сейсмическую интенсивность можно оценить и по соотношению количества раненых и убитых, при этом не требуется знание общего количества жителей:

$$I = 10.5 - 2.5 \lg(N_p/N_y) \pm 0.6,$$

рабочий диапазон реакции 8 – 11 баллов.

Заметим, что рабочий диапазон степени реакции по количеству раненых и убитых отличается от диапазона степени реакции по ощущениям людей.

### Инженерные сооружения

В последние годы был накоплен большой материал, относящийся к реакции на сейсмические воздействия различных инженерных сооружений, в первую очередь – транспортных сооружений и трубопроводов. В связи с этим изучался вопрос о возможности использования сведений о повреждениях таких сооружений в качестве признаков интенсивности сотрясений [Гехман, 1985; Карцивадзе, 1974; Напетваридзе и др., 1980; Окамото, 1980; Рашидов, 1975; Шестоперов, 1984]. Имелись три возможности. Первая состояла во включении в шкалу статистических характеристик повреждений инженерных сооружений, вторая – в расширении описательной части шкалы за счет описания типичного поведения таких сооружений при различной интенсивности сейсмических воздействий, третья – в полном отказе от использования такой информации. Мы считаем, что, вследствие высокого уровня стандартизации многих инженерных сооружений и быстрого роста количества объектов такого рода, первый путь наиболее перспективен. Однако, поскольку статистические характеристики повреждений этих классов объектов пока изучены недостаточно (например, отсутствуют оценки дисперсии соответствующих распределений), разумно сохранить их в составе описательной части.

Рассмотрим наиболее распространенные виды инженерных сооружений.

**Транспортные сооружения.** В связи с интенсивным строительством дорог (в том числе – в малонаселенных горных, таежных и пустынных районах) транспортные сооружения могут оказаться единственными, реакция которых может быть использована для оценки силы землетрясений в этих районах. В предлагаемой шкале макросейсмические критерии сейсмической интенсивности в более развернутой форме характеризуют воздействия землетрясений различной силы на мосты, земляное полотно, верхнее строение пути и твердое покрытие дорог. Типы дорожных сооружений приводятся в соответствии с принятой в транспортном строительстве терминологией. В частности, для наименования отдельных видов мостов приняты следующие термины: мост (через водоток), виадук (через долину, ущелье), путепровод (через дорогу), эстакада (через городскую или заводскую территорию, через пути на крупных станциях и др.).

Классификация повреждений основана на результатах инженерного анализа последствий при землетрясениях США, Японии и СССР силой от 8 до 10 баллов MSK или MM [Рашидов, 1975; Шестоперов, 1984 и др.].

Повреждения мостов можно разделить на две группы. К первой относятся повреждения, вызванные деформациями основания – эти повреждения проявляются в виде просадок (иногда поднятий), наклонов и горизонтальных смещений опор. Ко второй группе относятся повреждения, вызванные действием сейсмической нагрузки – они проявляются в виде поверхностных трещин и сколов бетона, разрывов (сквозных трещин) и разрушения несущих конструкций. К разрывам мы относим также сдвиги отдельных частей моста (например, сдвиг тела опоры относительно фундамента, подферменной плиты относительно тела опоры, пролетного строения относительно подферменной плиты).

Повреждения верхнего строения пути железных дорог и твердого покрытия автомобильных дорог, в основном, вызываются деформациями земляного полотна, которые проявляются в виде просадок (особенно часто просадки пути происходят на поймах рек, старицах и болотах), растяжения (на береговых склонах рек при подходе к мостам) и сжатия (вблизи устоев мостов). В некоторых случаях происходит обрушение верхнего строения пути из-за разрушения насыпи и действия сейсмической нагрузки на рельсо-шпаловую клетку. На горных участках дорог движение нередко прерывается из-за возникающих при землетрясениях оползней и обвалов. Подобные нарушения отнесены нами к реакции элементов грунта и рельефа. Повреждения пути иногда являются причиной аварий подвижного состава. При наиболее сильных землетрясе-

ниях может произойти опрокидывание вагонов и локомотивов, стоящих на станционных путях.

На сейсмостойкость мостов и других транспортных сооружений существенное влияние оказывает тип и состояние грунтов в основании, конструкция фундаментов, опор и опорных частей, характер эксплуатационной нагрузки и ряд других факторов. В большинстве имеющихся описаний приводятся лишь качественные характеристики сооружений и полученных ими повреждений без указания размеров и армирования несущих конструкций типа грунта, крутизны склонов, с которых произошли обвалы, и других необходимых для объективного анализа данных. Поэтому в проекте шкалы количественные показатели деформаций даны не во всех случаях. Приведенные величины деформаций следует понимать как близкие к средним при данной силе землетрясения. Под значительными деформациями понимаются трещины, а также осадка и горизонтальные перемещения конструкций до 30 см.

**Сетевые сооружения.** Разрушения подземных трубопроводов, более чувствительных к сейсмическим воздействиям, чем наземные сетевые сооружения, не находили ранее отражения в сейсмических шкалах. В шкале MSK-64, например, не указывается о разрушении каких трубопроводов идет речь. Необходимые критерии оценки интенсивности землетрясения по данным о состоянии трубопроводов были разработаны на основании сопоставления повреждаемости традиционных групп объектов, находящихся на одной и той же площадке и работавших в сходных условиях [Рашидов, 1975 и др.]. Сейсмические воздействия на трубопроводы, как и воздействия на другие объекты, существенно зависят от грунтовых условий. В случае трубопроводов, однако, появляется специфическая ситуация, связанная с их линейной протяженностью и состоящая в том, что линия трубопровода или иного сетевого сооружения пересекает зону контакта разнородных по физико-механическим свойствам грунтов. При этом в месте перехода резко меняется характер движения грунта и, естественно, характер воздействия на соседние участки или опоры сооружения, что создает дополнительные разрушающие усилия. По этой причине участки смены свойств грунтов должны входить в число характеристик сетевых сооружений и учитываться при использовании степени их реакции для оценки балльности.

Для непосредственной оценки балльности необходимо выделить основные типы трубопроводов, различающихся по их положению относительно дневной поверхности (надземные, наземные засыпанные, наземные открытые, подземные), по материалу (асбоцементные, бетонные, железобетонные, керамические, стальные) и по характеру стыков (сварные – жесткие и нежесткие). Для надземных трубопроводов до-

полнительно следует учесть глубину заложения опор-стоек (неглубокие и глубокие) и, в какой-то степени, их материал. Весьма специфическими являются и сами повреждения трубопроводов, что требует специальных методов обследования для их выявления после землетрясения [Гехман, 1985; Напетваридзе и др., 1980].

В настоящее время представляется возможным рассмотреть следующие степени реакции трубопроводов на сейсмические воздействия:

- легкие повреждения (деформация опор, смещение трубопроводов на свободноподвижных опорах, тонкие трещины в опорах, трещины и небольшие оползания в обваловке наземных трубопроводов);
- тяжелые повреждения (большие перекосы, просадки и опрокидывание опор, значительные смещения трубопроводов на опорах, разрушение насыпи наземных трубопроводов);
- разрушения (разрывы трубопроводов, не имеющих продольной компенсации, нарушения стыков, сброс трубопроводов с опор, потеря устойчивости трубопроводов с образованием арок, гофр, вмятин).

В дальнейшем, по мере накопления, эти данные будут систематизированы с целью перехода к статистической оценке балльности по повреждениям трубопроводов подобно тому, как это делается для зданий. Аналогичная работа должна быть проведена и по другим видам сетевых сооружений. На данном этапе признано целесообразным сохранить признаки повреждения трубопроводов лишь в описательной части шкалы.

### Элементы грунта и рельефа

Целесообразность учета данных об изменениях элементов грунта и рельефа для оценки интенсивности вызвавшего их землетрясения европейские специалисты единодушно отрицают. Так считают Н. Амбрезис, Ж. Фохт, Г. Грюнталь и многие другие [Thoughts..., 1989]. По данным Н. Амбрезиса использование таких данных в зоне неустойчивых склонов может привести к завышению сейсмической интенсивности до 2-х баллов. Для Европы эти соображения резонны. Однако в областях с редким населением и ненарушенным в результате хозяйственной деятельности рельефом такими данными пренебрегать не следует. К тому же, опасность полной утраты макросейсмической информации в таких местах больше, чем опасность завышения балльности, а меньшую надежность оценок сейсмической интенсивности по реакции грунтов и рельефа можно специально оговорить. Мы сохранили критерии и формулировки, предложенные в работе [Кулиев, Шебалин, 1970] с учетом интересных предложений из работы [Солоненко, 1975]. Использование статистических оценок [Леонов, 1975] в настоящее время кажется преждевременным.

## Реакция объектов “статистического” типа

Совершенно очевидно, что для любых объектов существует порог чувствительности (нулевая реакция) и порог насыщения, после которого увеличение силы воздействия ничего не меняет в состоянии объекта. Ввести нулевую градацию в шкалу повреждений зданий предлагалось неоднократно [Thoughts..., 1989], однако в окончательном варианте шкалы EMS [Grunthal, 1998] такая градация отсутствует. В шкале MMSK-92 нулевая реакция используется для всех видов объектов. Отметим, что предложение Х.Тидеманна – идентифицировать реакцию зданий с классическим определением уязвимости – не выдерживает критики с точки зрения равномерности сейсмической шкалы. По определению, уязвимость есть отношение затрат на восстановление объекта к его стоимости после восстановления. Несмотря на существенное увеличение числа градаций (7) в шкале Х.Тидеманна, теряется различие между степенями повреждения 4 и 5 по шкале MSK, ибо в обоих случаях здание восстановлению не подлежит. Поэтому употребление шкалы уязвимости  $V$  зданий (обычно говорят о матрице уязвимости или функции уязвимости  $V = V(I)$ , где  $I$  – сейсмическая интенсивность), вполне обоснованное при расчетах сейсмического риска (т.е. экономического ущерба при землетрясениях), не столь эффективно при оценке сейсмических воздействий.

Прямые оценки параметров распределения числа зданий по всем степеням повреждения от 0 до 5 [Поляков и др., 1982; Шебалин, 1969; Шебалин, 1975б; Bottari et al., 1986; Schenkova, Prochazkova, 1981; Velkov, 1989] позволили установить чрезвычайно важную закономерность: *число зданий одного типа, находящихся в близких грунтовых условиях и подвергшихся воздействию землетрясения, распределено по степени их повреждения приблизительно по нормальному закону с дисперсией около 0.7 единицы шкалы повреждений.*

Оценка дисперсии, полученная без каких-либо предварительных допущений, замечательным образом совпадает с интуитивной статистикой С.В.Медведева: при 5% зданий с высшей наблюдавшейся степенью повреждения, 50% – со степенью повреждения, меньшей на 1.0, и естественном предположении о симметрии распределения легко получить, что “шкальные” проценты соответствуют дисперсии 0.63 единицы. Для степеней реакции людей и предметов быта аналогичные выводы получены в работах [Ершов, 1982; Шебалин, 1975а]. Использование для оценки интенсивности землетрясений всех наблюдаемых степеней реакции позволяет избежать смещенности оценок. Опыт обследования многих последних землетрясений показал (а опыт длительных дискус-

сий Специальной Группы ЕСК [Аптикаев, 1972; Мартемьянов, Ширин, 1982; Thoughts..., 1989] подтвердил), что, пока в употреблении будут находиться не вполне ясные понятия типа “отдельные”, “многие” и т.п., или же пока графы шкалы будут содержать те или иные словесные формулировки, сейсмическую шкалу не удастся ввести в рамки строгой статистики степеней реакции. Более того, существование в шкале нечетких словесных понятий и формул подталкивает обследователей к оценкам “на глаз”, что, конечно, проще, но вряд ли надежней.

Для того чтобы обеспечить при оценке балльности использование наблюдений, а не впечатлений, необходимо для каждого обследованного здания знать его тип и оценить его повреждения; для каждого объекта иного рода – знать его тип и оценить его реакцию. Добиться этого можно лишь полным отказом от рыхлых словесных формулировок и переходом к числу, а именно – к средней степени реакции в изученной выборке. Участники дискуссий как-то забывают, что если обследование документируется, то число зданий с той или иной степенью повреждения известно точно. Если оно точно не известно, это означает только одно: обследования, по существу, не было, был лишь поверхностный обзор ситуации, на котором нельзя основывать объективную оценку балльности.

Говоря о проблеме оценки средней степени повреждения, нельзя не остановиться на предложении С.В.Полякова и соавторов [Поляков и др., 1982]. Авторы этой работы установили, что в пределах одного здания числа конструктивных элементов распределены по степени их повреждения также по нормальному закону. Это дает им серьезные основания для того, чтобы предложить – определять степень повреждения каждого отдельного здания как статистическое среднее по данным о распределении числа конструктивных элементов по степеням повреждения. Логически это предложение было бы безупречным, если бы не существовало степеней повреждения 4 и 5, относящихся не к конструктивным элементам, а к зданию в целом. Кроме того, в реальных условиях обследование типа [Поляков и др., 1982] занимает в несколько раз больше времени, чем определение один раз встреченного в здании повреждения высшей степени. Признавая предложения авторов работы [Поляков и др., 1982] разумным и желательным приемом при серьезных методических работах, в рабочем варианте шкалы мы все же вынуждены сохранить в качестве входного параметра высшую замеченную в здании степень его повреждения. Надежность оценок при этом достигается за счет вычисления степени повреждения, средней для группы однотипных зданий, находящихся в сходных условиях.

### Переход от степени реакции объектов к балльности

Введение порога чувствительности и порога насыщения реакции объектов предполагает, что вблизи этих порогов большие изменения балльности не влекут за собой заметного изменения реакции. Так, увеличение интенсивности от 3 до 6 баллов не сказывается заметно на реакции зданий. Столь же безразличны глинобитные сельские постройки к увеличению интенсивности от 9 до 12 баллов – при 9 баллах они уже лежат грудой развалин. Линейный характер зависимости степени реакции от балльности наблюдается лишь в ограниченном диапазоне сейсмической интенсивности, зависящем от вида объекта. Далее, по замыслу С.В.Медведева, приращению интенсивности на один балл должно соответствовать, при прочих равных условиях, приращение степени повреждения также на единицу. Кроме того, при равной интенсивности степень повреждения у зданий соседних типов также должна различаться на единицу. Первое из этих условий в шкале, в общем, приблизительно выполняется, однако второе – по крайней мере, для зданий – соблюсти не удается: материалы наблюдений показывают, что степени повреждения в основных типах зданий при равной интенсивности различаются меньше, чем на единицу. Для предметов быта второе условие выполняется вне области порогов, для людей это условие в полной мере выдержать не удалось.

Рассмотрим некоторые особенности перехода от средней степени реакции к балльности для разных типов объектов.

**Здания.** Большой объем наблюдений, накопленный в последние годы, позволил уточнить функции перехода от степени повреждения зданий к балльности [Баранников и др., 1970; Газлийское..., 1982; Га-рагозов и др., 1985; Ершов, 1982; Ершов, Попова, 1985; Мартемьянов, Ширин, 1982; Поляков и др., 1982; Ципенюк, 1988; Bottari et al., 1985; Кеңебаев, 1989]. Особенно хотелось бы отметить подробные данные И.А.Ершова, Е.Кеңебаева, А.И.Мартемьянова и В.В.Ширина. При составлении шкалы MMSK-92 мы опирались на эти данные вместе с собственными наблюдениями. При типизации зданий мы исходили из того, чтобы попарные различия в повреждаемости зданий различных типов в среднем были не меньше 1/3 единицы шкалы повреждений. По вопросу о переходе от реакции  $r$  к балльности  $I$  для сейсмостойких зданий в данном варианте шкалы мы исходим из реальной ситуации, отвечающей общим принципам задания уровня сейсмостойкости [СНиП..., 2000], и принимаем  $r_{C9} = 2.5$  (примерно 45% зданий типа C9 могут иметь повреждения второй степени, столько же – третьей степени и по 5% повреждений – нулевой и четвертой степени). Это близко к реконструкциям из работы [Кеңебаев, 1989] и может служить опорным значе-

нием для построения всей системы переходных функций. Для удобства пользования в шкалу целесообразно ввести не графики и не средние значения, а табулированные значения степени повреждения для различной интенсивности с шагом 1 балл – они приведены в табл.3 Приложения.

В связи с тем, что в дальнейшем возможен переход к оценке балльности с шагом в 1/2 балла, соответствующий вариант перехода приведен также в табл.3 Приложения.

**Люди и предметы быта.** Функции перехода от степени реакции объектов к балльности представлены в тексте шкалы.

### **Приоритеты объектов и осреднение оценок интенсивности**

Известно, что в реальных ситуациях оценки балльности, полученные по реакции объектов различного вида, могут не совпадать. Следовательно, необходимо установить приоритеты различных видов объектов, используемых для оценки балльности, а также разработать способы осреднения оценок. Ранее ни в одном варианте шкалы такой вопрос не поднимался. В настоящем проекте в связи с резким расширением видов и типов объектов от такой проблемы уклониться уже нельзя.

Внутри группы объектов одного вида также следует помнить о предпочтительности использования тех или иных типов объектов. Так, до последнего времени здания типа Б (В) (“обычные” 3–4 –этажные кирпичные дома) эталоном служили меньше, чем здания других типов, различающиеся и по свойствам материала и по технологии строительства, а, следовательно, по уязвимости. В странах, граничащих с Россией с юга, здания этого типа явно не доминируют: здесь чаще всего встречаются саманные дома хорошей постройки, здания типа “мидис” (с которыми до сих пор не разобрались кавказские специалисты), а в новых поселках и городах – сборные щитовые дома, панельные здания и другие “современные” постройки. Отсутствие одного “лидирующего” типа зданий делает наиболее рациональным учет всего объема обследований по простому правилу средневзвешенной оценки. При этом, однако, возникает проблема весовых функций, которые, по-видимому, могут учитывать приоритет видов и типов объектов, число обследованных объектов каждого типа, а также надежность перехода от степени реакции объекта к балльности. Как указывалось ранее, надежность такого перехода низка вблизи порогов чувствительности и насыщения и высока в середине интервала. Значения интервалов с почти линейной реакцией различных объектов приведены в табл.4 Приложения, там же в табл.5 приведены приоритеты видов объектов в зависимости от их вида и сейсмической интенсивности. Значения весовых функций вычислены для всех основных объектов и приведены в тексте шкалы.



### Инструментальные данные

История взаимоотношения описательных и инструментальных данных, характеризующих эффект сейсмических воздействий, достаточно поучительна. Уже в самом начале истории шкал сейсмической интенсивности в конце XIX века делались попытки поставить в соответствие баллы макросейсмической шкалы и весьма немногочисленные данные о сейсмическом движении грунта. Использовались также виброплатформы, на которых размещались брусочки, имитирующие здания. Разрушительным землетрясениям приписывалось ускорение, при котором брусочки падали. Ощущение потребности в жесткой “инженерной” трактовке понятия балльности привело С.В. Медведева к созданию специального прибора – сейсмоскопа СБМ, упрощенно моделирующего поведение наиболее распространенного типа зданий [Медведев, 1962]. При этом предлагалось определять балльность в первую очередь по показаниям этого прибора и лишь в отсутствие таких показаний – по макросейсмическим данным. Эта идея была подхвачена А.Г. Назаровым [Сейсмическая..., 1975], по замыслу которого был создан многомаятниковый сейсмоскоп и разработана процедура определения балльности по его показаниям. Практика использования сейсмоскопов у нас и за рубежом показала низкую эффективность приборов этого типа. Появление новых типов более совершенной сейсмологической аппаратуры, в первую очередь – цифровой, заставили полностью отказаться от использования сейсмоскопов. Еще недавно при обсуждении вопроса о корреляции динамических характеристик сейсмических колебаний с макросейсмической балльностью приходилось прежде всего обращать внимание на очень большую дисперсию инструментальных данных [Сейсмическая..., 1975; Медведев, 1978]. Обращалось внимание на непригодность инструментальных критериев шкалы MSK-64 (например, при землетрясении Вранча 1977 г. пиковым ускорениям соответствует интенсивность 8+ баллов, пиковым скоростям – интенсивность 10+ баллов, показаниям сейсмоскопа – интенсивность СБМ 7+ баллов).

Как показали наши исследования [Аптикаев, 1973; Аптикаев, 1999; Аптикаев, 2000; Аптикаев, Шебалин, 1989], погрешности существующих инструментальных шкал связаны с целым рядом неоправданных допущений. Например, эмпирическими данными не подтвердились допущения: об удвоении амплитуды ускорений на балл; о равенстве такого шага шкалы для ускорений и скоростей; о логнормальном распределении амплитуд, соответствующих определенному баллу; о представительности выборки инструментальных данных в области малых интенсивностей.

В шкале MMSK-92 корреляция инструментальных и макросейсмических оценок проведена по представительному объему данных. Заме-

тим, что к моменту составления шкалы MSK-64 отсутствовали записи 9-балльных землетрясений, а записей 8-балльных землетрясений было только восемь. При обработке данных нами был произведен учет потери значительной части данных, связанной как с несрабатыванием аппаратуры сильных движений на относительно слабые воздействия, так и нежеланием обрабатывать записи слабых колебаний, неинтересных с точки зрения инженеров-строителей. После введения соответствующих поправок инструментальная шкала (а, следовательно, и макросейсмическая шкала, с которой тесно коррелируются инструментальные данные) оказалась вполне равномерной.

Другим важным результатом наших исследований оказалось явное занижение уровня колебаний при разрушительных землетрясениях в шкале MSK-64, что связано, главным образом, с постулатом удвоения амплитуды колебаний при изменении сейсмической интенсивности на один балл. На самом деле изменение амплитуды более значительно. При этом, для скоростей эти изменения больше, чем для ускорений, а для смещений – больше, чем для скоростей. При корреляции амплитуд колебаний грунта с сейсмической интенсивностью получены и оценки стандартного отклонения, примерно одинаковые для интенсивности и для амплитуд, нормированных на шаг шкалы.

По нашим данным в инженерном диапазоне 7 – 9 баллов погрешность оценок сейсмической интенсивности составляет менее 1/2 балла, а соответствующих ускорений грунта менее 0.2 единицы десятичного логарифма. Такая дисперсия вполне сопоставима с дисперсией степени повреждений однотипных зданий, находящихся в сходных условиях. Преимуществом макросейсмических оценок является то, что они, как правило, являются средними для значительного объема данных, в то время как инструментальные оценки обычно производятся по отдельной записи.

Фактически корреляция сейсмической интенсивности с ускорениями, скоростями и смещениями грунта является многопараметрической инструментальной шкалой. Попытки ввести в шкалу (кроме уровня) другие характеристики колебаний проводились неоднократно [Аптикаев, 1973; Аптикаев, 1975; Аптикаев, 1999; Аптикаев, Шебалин, 1989; Гвишиани и др., 1988; Долгополов, Плетнев, 1978; Плетнев и др., 1975; Чернов, Соколов, 1983; Schenk, Schenkova, 1981].

Однако, поскольку многие параметры сейсмических колебаний коррелируются между собой [Аптикаев, Михайлова, 1988; Michailova, Artikaev, 1996], формальное сопоставление сейсмической интенсивности и всевозможных характеристик движения грунта малоперспективно. Прежде, чем приступать к такому сопоставлению необходимо уста-

новить взаимозависимость параметров колебаний. Результаты работ [Аптикаев, 1981; Аптикаев, 1985] показали, что основными параметрами колебаний являются: уровень, частотный состав и продолжительность колебаний (ширина импульса), определенная как интервал времени, в течение которого уровень огибающей превосходит половину максимальной амплитуды. Логарифмическая ширина спектра оказывается весьма стабильной величиной, а преобладающая частота колебаний в значительной степени учитывается совместным рассмотрением ускорений, скоростей и смещений. Учет же длительности колебаний почти вдвое уменьшает величину дисперсии при корреляции параметров колебаний с сейсмической интенсивностью.

По эмпирическим данным нами найдены следующие соотношения: для ускорений колебаний грунта  $A$

$$I = 2.5 \lg A, \text{ см/с}^2 + 1.25 \lg d, \text{ с} + 1.05 \pm \sigma,$$

значение стандартного отклонения  $\sigma = 0.5$  для  $I > 6$  и  $\sigma = 0.75$  для  $I \leq 6$ ;

для скорости колебаний грунта  $V$

$$I = 2.13 \lg V, \text{ см/с} + 1.06 \lg d, \text{ с} + 3.83 \pm 0.50;$$

для смещений грунта  $D$

$$I = 1.47 \lg D, \text{ см} + 0.74 \lg d, \text{ с} + 5.46 \pm 0.75.$$

Для оценки балльности использовать можно только записи приборов, установленных на свободном грунте или, в крайнем случае, на первом этаже здания.

Весьма перспективны для определения балльности остаточные смещения. Из известных результатов Ю.И. Васильева [Васильев и др., 1977] следует, что при интенсивности менее 5 баллов остаточные деформации грунта практически отсутствуют. С другой стороны, известны гигантские остаточные смещения при землетрясениях типа Мино-Овари, достигающие 20 метров. Можно с уверенностью сказать, что такая шкала не была построена ранее только из-за отсутствия представительных данных. Теперь, благодаря работам [Богданов и др., 1978; Грайзер, 1983; Грайзер, Молотков, 1983], такая возможность появилась. Следует заметить, что данные об остаточных смещениях, введенные в шкалу, относятся только к эпицентральной зоне (т.е. к зоне, ограниченной первой изосейстой); за пределами эпицентральной зоны остаточные смещения, по-видимому, будут меньше. Величина стандартного отклонения для остаточных смещений пока не оценена.

### Оценка балльности по магнитуде и расстоянию

Связь между сейсмической интенсивностью  $I$ , магнитудой землетрясения  $M_S$  и гипоцентральной расстоянием  $R$  от очага до точки наблюдения определяется уравнением макросейсмического поля, предложенным Н.В. Шебалиным [Шебалин, 1968]. Региональные значения коэффициентов в уравнении макросейсмического поля в настоящее время определены для многих районов мира. Учет затухания балльности с расстоянием может производиться как с совместным, так и с отдельным учетом расхождения и поглощения [Кондорская, Шебалин, 1977]. В работе [Бузрукова, Шебалин, 1980] показано, что для районов с различным геологическим строением коэффициент геометрического расхождения  $b$  в уравнении макросейсмического поля вида

$$I_i = aM_s - b \lg R_i - pR_i + c$$

варьирует меньше, чем коэффициент поглощения  $p$ . Для придания универсальности в данном варианте шкалы было использовано надежно определенное значение  $b = 2.63$  для Дальнего Востока [Кондорская, Шебалин, 1977], значение  $p = 0.0025$  на платформах и  $p = 0.0009$  в тектонически активных районах. Учитывая, что очаги землетрясений располагаются чаще всего в тектонически активных районах, а также то, что затухание интенсивности на платформах и в орогенных зонах до расстояния 150 км различается менее, чем на 1 балл, мы сконструировали таблицу для оценки предполагаемой балльности землетрясений по их магнитуде и эпицентральному расстоянию так, чтобы определить интервалы магнитуд и расстояний, соответствующие интенсивности каждого фиксированного балла (см. Приложение, раздел 7.3). Точность оценок при этом составляет  $\pm 1$  балл. Следует заметить, что в ближней зоне, где сильно сказываются погрешности определения эпицентра и глубины очага, данный способ ненадежен. Поэтому рекомендуется для оценки предполагаемой балльности применять этот способ не ближе 30 км к инструментальному эпицентру.

### Уточнение сопоставления различных сейсмических шкал

В работах [Кулиев, Шебалин, 1970; Ципенюк, 1988 и др.] было установлено, что распределение повреждаемости зданий подчиняется нормальному закону, а шкала типа MSK-64 является шкалой интервалов (т.е. допускает использование дробных долей балльности). Тем не менее сопоставление различных сейсмических шкал, как правило, носит качественный характер и приводится с точностью до 1 балла [Горшков, Шенкарева, 1959; Медведев, 1968; Grunthal, 1998]. В сборнике [Сейсмическая..., 1975] было рассмотрено несколько примеров корреляции

различных шкал и, в частности, приведены данные о неравномерности шкалы ММ по отношению к шкале MSK-64. Эта очевидная внутренняя неравномерность шкалы ММ была замечена и обсуждается европейскими сейсмологами [Minutes..., 1990]. Мы ввели в шкалу наши результаты сопоставления основных используемых в настоящее время шкал.

### Направления дальнейших исследований

Практика оценок ожидаемых сейсмических воздействий настойчиво требует дальнейшего совершенствования сейсмических шкал, в том числе и еще не утвержденной шкалы MMSK-92. Два процесса – утверждение и внедрение в обязательную практику шкалы MMSK-92 и дальнейшие исследования в области совершенствования сейсмических шкал – должны идти параллельно, не мешая друг другу.

Намечаются следующие основные направления дальнейшей работы по усовершенствованию сейсмической шкалы.

**Концепция.** Концептуальная основа шкалы до сих пор практически не разработана. Представления о геофизической сущности понятия “балльность” варьируют весьма широко – от представления о балльности как характеристике исходного процесса, до приравнивания ее просто к уровню убытков и жертв. Мы придерживаемся в этом вопросе следующей позиции: уровень всякого неблагоприятного или опасного геофизического явления (НОЯ), в том числе и землетрясения, характеризуется его магнитудой. В случае, если НОЯ порождает один или несколько поражающих факторов, их воздействие приводит к природной катастрофе, уровень которой характеризуется геофизической интенсивностью, или балльностью (термин “интенсивность” не очень удачен, здесь важнее именно разрушительная способность, которая может возникать и при относительно невысокой интенсивности процесса). Поэтому, быть может, следовало бы ввести понятие деструктивности и назвать нашу шкалу *шкалой деструктивности*. Деструктивность процесса может реализоваться лишь в условиях уязвимой техносферы ненулевой плотности, что приводит к стихийному бедствию, уровень которого характеризуется простой шкалой убытков и жертв, одинаковой для всех видов геофизических (и не только геофизических) катастроф. Возможны, разумеется, и другие подходы; так или иначе, дискуссия по концепции сейсмической шкалы представляется нам полезной.

**Очаговые зоны.** Поскольку доказано влияние типа подвижки в очаге на уровень колебаний [Аптикаев, Копничев, 1979; Artikaev, Kopnischev, 1980] и на закономерности затухания амплитуд в эпицентральной зоне [Аптикаев, Эртелева, 2002], целесообразно оценить и влияние типа подвижки на уровень и затухание сейсмической интенсивности.

**Объекты.** Среди объектов, введение которых в шкалу представляется целесообразным, укажем на высокие здания и высокие сооружения (башни, трубы, мачты с оттяжками и без них) и определенные типы технологического оборудования (станки, колонны, стенды, пульта, трубопроводы в зданиях и др.). Необходимо параметризовать и перевести на статистическую основу реакцию сетевых и транспортных сооружений, следует продолжить попытки параметризовать реакции грунта и ландшафта.

**Записи приборов.** Желательно проведение специальных экспериментов на густых сетках приборов с целью определения радиуса представительности показаний этих приборов в зависимости от местных условий. Оценки параметров движения грунта могут быть использованы для сопоставления различных шкал. Например, распределение амплитуд ускорений при 8 баллах по шкале MMSK-92 оказалось в точности соответствующим распределению амплитуд при 5 баллах шкалы JMA.

**Обобщения и статистика.** При решении проблемы наиболее адекватного соответствия между совокупностью имеющихся данных об эффектах землетрясения и уровнем его деструктивности большого внимания заслуживают разработки Н.И. Онофраша, А.А. Романа и В.И. Шумилы [Онофраш, Роман, 1979; Шумила, 1983], которые в наиболее общей форме решают проблему определения (распознавания) сейсмической балльности по некоторой произвольной совокупности макросейсмических и инструментальных данных.

**Уязвимость зданий.** Совершенно очевидно, что в следующем варианте шкалы стоимостные оценки выйдут на первый план. Необходимо установить нормативные (или хотя бы “обычные”) правовые соотношения между тремя тесно связанными шкалами: шкалой уязвимости объектов, включенных в шкалу сейсмической интенсивности, шкалой степеней повреждений и шкалой решений о судьбе пораженного здания или инженерного сооружения (не пострадало, подлежит косметическому ремонту, подлежит текущему ремонту, подлежит капитальному ремонту, требует перестройки с усилением, требует сноса). Еще один важнейший для будущего аспект – экспертиза истинной балльности при решении вопроса о страховых платежах.

**Типизация и дифференциация балльности.** Это направление представляется наиболее многообещающим и важным. Дело в том, что по физической сути, спектральному составу, продолжительности колебаний, поляризации и другим параметрам сейсмические воздействия можно разделить на три типа в зависимости от магнитуды и эпицентрального расстояния – эпицентральная, ближняя и дальняя зоны. Сейсмические воздействия в Каракасе (1967 г.), Бухаресте (1977 г.) и

Мехико-Сити (1990 г.) по обычным меркам были не столь уж и сильными, однако они привели к обрушению (правда, небольшого числа) зданий. Парадокс другого типа связан с эффектом разжижения грунта, когда целое здание получает повреждение 5-й степени без проявления промежуточных эффектов – трещин и др. (заваливание домов в Нигате, 1964 г.). Своеобразной может быть и реакция людей. При коротком “эпицентральном” воздействии землетрясений небольшой магнитуды люди не успевают оценить реакцию своего окружения, и их поведение достаточно разнообразно. При длительном воздействии формируется толпа с единым, плохо предсказуемым поведением, и реакция становится однородной, но неадекватной по уровню. Разнообразие сейсмических эффектов одинаковой балльности может быть связано с различием в параметрах сейсмического движения грунта. Например, можно говорить о коротко-, средне- и длиннопериодных колебаниях по спектральному составу и кратковременных, нормальных и продолжительных колебаниях по времени воздействия. Особым видом воздействия являются остаточные деформации, в частности – выход разрыва на дневную поверхность. Для определенных сейсмоактивных зон может быть поставлен вопрос о создании региональных шкал сейсмической интенсивности. Нелегкие разработки в этих направлениях весьма желательны и могут в принципе значительно улучшить шкалу.

**Исторические землетрясения.** Здесь остро ощущается необходимость построения специальных шкал, где на входе были бы типичные формулировки, описывающие землетрясения в старинных хрониках, летописях и т.п., а на выходе – балльность, максимально согласованная с балльностью MSK. Некоторые разработки в этом направлении велись Н.В.Шебалиным, И.В.Ананьиним, Р.А.Затикяном, А.А.Никоновым, А.А.Романом, Р.Э.Татевосяном, и можно надеяться, что результаты такой работы позволят заметно уменьшить произвол в оценке интенсивности исторических землетрясений.

**Исследование внутренней равномерности шкалы.** Для выполнения этой работы необходимы унифицированные карты изосейст, при составлении которых использовалась та или иная из упомянутых шкал. Выполнение этой работы не встретит особых затруднений. Другим мощным средством оценки равномерности шкал являются инструментальные данные.

**Точность.** Воспитание в обследователях привычки к точной фиксации числа зданий с разными степенями повреждений и повышение культуры сейсмического обследования приведут к заметному уменьшению разброса в оценках балльности. Это сделает возможным давно назревшее введение в шкалу половинок балла с указанием среднеквадратиче-

ской погрешности оценок балльности. Заметим, что опытные исследователи уверенно выделяют участки с дробными значениями балльности. В то же время, действующая шкала предписывает округлять оценки до целых значений. В результате во многих публикациях появились оценки вида “7–8 баллов”, что лишь запутывает пользователя: становится не ясно – имеет ли место высокая точность оценок и наблюдаемая балльность равна 7.5 баллов, или наоборот – такой вид записи характеризует неуверенность оценки. Разумеется, свою отрицательную роль в этом сыграла традиция записывать балльность римскими цифрами. В целях создания наблюдательной базы для повышения точности целесообразно отыскивать по материалам обследований и сводить в “эталонные” типы часто встречающиеся объекты со стабильной уязвимостью. Прекрасный пример использования таких многочисленных объектов, а именно – бетонных мостов у стандартных колодцев для скота в Кара-Кумах – дал Т.П. Белоусов после Газлийского землетрясения 1983 г. [Белоусов, Теремецкий, 1987]. Стандартные домики, водонапорные башни, трансформаторные будки, столбы, люди одной возрастной и социальной категории (например, учащиеся техникумов), стандартные стаканы, бутылки, маятниковые часы, детские коляски, холодильники – вот далеко не полный перечень возможных эталонных объектов, поведение которых, в случае нужды, может быть математически формализовано.

**Низшие баллы.** Известно, что наличие или отсутствие изолиний балльности  $I = 3$  на макросейсмических картах есть надежный признак качества обследований в данном месте. Например, после работ Е.И. Бюса из описаний и карт исчезают данные об интенсивности 3 балла. Налицо деградация качества обследования.

**Региональные шкалы.** Созданию региональных сейсмических шкал способствуют два основных фактора. Во-первых, действующая сейсмическая шкала безнадежно устарела; возникает задача создания локальной шкалы, которую можно было бы утвердить в качестве региональных норм. Во-вторых, вследствие различий в климатических условиях и местных строительных традиций здания по своей уязвимости существенно различаются в разных регионах. В ряде областей такие шкалы уже существуют [Аптикаев и др., 1996; Аптикаев и др., 1999; Шерман и др., 2000]. Разрабатывается шкала для Камчатского региона. Таким образом, возникает проблема взаимоотношения региональных и федеральной шкал.

Таковы беглые рекомендации на будущее. Можно надеяться, что новые важные идеи возникнут в ходе обсуждения предлагаемого проекта.



### **Заключение**

Составлен проект нового варианта сейсмической шкалы, баллы которой тождественны баллам шкалы MSK-64. Процедура оценок эффекта землетрясения и обработки полученных данных существенно улучшена и представляет собой стройный алгоритм, обеспечивающий высокую воспроизводимость оценок и гарантирующий независимость от эмоционального состояния наблюдателя. Шкала допускает определение интенсивности землетрясений по значительно расширенному кругу объектов при различной обеспеченности данными. Шкала также создает основу для оценки возможного уровня воздействий будущих землетрясений заданной балльности. Намечены пути дальнейшего совершенствования шкалы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ШКАЛА ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ MMSK-92 (проект)

#### 1. Назначение шкалы

Настоящая шкала предназначена:

- для определения интенсивности землетрясений на поверхности Земли в пределах от 1 до 12 баллов включительно;
- для оценки ожидаемых параметров движения почвы при будущих землетрясениях с заданной интенсивностью.

Шкалой надлежит руководствоваться при изучении происшедших землетрясений, при составлении документов общего и детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования, а также при оценке возможных последствий ожидаемых землетрясений.

#### 2. Исходные данные

**2.1. Статистические макросейсмические данные:** реакция на землетрясение следующих видов объектов: а) зданий и типовых сооружений; б) людей; в) предметов быта.

**2.2. Описательные макросейсмические данные:** а) о реакции на землетрясения инженерных (сетевых и транспортных) сооружений; б) о природных явлениях на поверхности Земли.

**2.3. Инструментальные (инженерно-сейсмометрические) данные:** измеренная в пункте определения интенсивность, максимальное ускорение, скорость и смещение сейсмических колебаний грунта и остаточного смещения.

**2.4. Сейсмологические данные:** магнитуда землетрясений и эпицентральное расстояние до пункта определения интенсивности.

#### 3. Здания и типовые сооружения

##### 3.1. Классификация

###### Местные здания

Тип А1 – здания со стенами из местных строительных материалов: глинобитные без каркаса, саманные или из сырцового кирпича без фундамента, выполненные из окатанного или рваного камня на глиняном растворе и без регулярной (из кирпича или камня правильной формы) кладки в углах и т.п.

Тип А2 – здания со стенами из самана или сырцового кирпича, с каменными, кирпичными или бетонными фундаментами; выполненные из рваного камня на известковом, цементном или сложном растворе с регулярной кладкой в углах; выполненные из пластового камня на известковом, цементном или сложном растворе; выполненные из кладки типа “мидис”; здания с деревянным каркасом с заполнением из самана или глины, с тяжелыми земляными или глиняными крышами; сплошные массивные ограды из самана или сырцового кирпича и т.п.

Тип Б – здания с деревянным каркасом с заполнением из самана или глины и легкими перекрытиями.

Тип В – деревянные дома, рубленные “в лапу” или “в обло”.

#### Типовые здания и сооружения

Тип Б – здания из жженого кирпича, тесаного камня или бетонных блоков на известковом, цементном или сложном растворе: сплошные ограды и стенки, трансформаторные киоски, силосные и водонапорные башни.

Тип В – железобетонные, каркасные, крупнопанельные и армированные крупноблочные дома; железобетонные сооружения: силосные и водонапорные башни, маяки, подпорные стенки, бассейны и т.п.

#### Типовые здания и сооружения с антисейсмическими мероприятиями

Тип С7 – типовые здания и сооружения всех видов (кирпичные, блочные, панельные, бетонные, деревянные, щитовые и др.) с антисейсмическими мероприятиями для расчетной сейсмичности 7 баллов.

Тип С8 – то же для расчетной сейсмичности 8 баллов.

Тип С9 – то же для расчетной сейсмичности 9 баллов.

*Примечание:* при сочетании в одном здании признаков двух или трех типов здание в целом следует относить к слабейшему из них.

### **3.2. Степень реакции (повреждаемость) $r_d$**

Степень 0 – отсутствие видимых повреждений. Сотрясение здания в целом; сыплется пыль из щелей, осыпаются чешуйки побелки.

Степень 1 – слабые повреждения. Слабые повреждения материала и неконструктивных элементов здания: тонкие трещины в штукатурке; откалывание небольших кусков штукатурки; тонкие трещины в сопряжениях перекрытий со стенами и стенового заполнения с элементами каркаса, между панелями, в разделке печей и дверных коробок; тонкие трещины в перегородках, карнизах, фронтонах, трубах. Видимые повреждения конструктивных элементов отсутствуют. Для ликвидации повреждений достаточен текущий ремонт здания.

Степень 2 – умеренные повреждения. Значительные повреждения материала и неконструктивных элементов здания, падение пластов штукатурки, сквозные трещины в перегородках, глубокие трещины в карнизах и фронтонах, выпадение кирпичей из труб, падение отдельных черепиц. Слабые повреждения несущих конструкций: тонкие трещины в несущих стенах, незначительные деформации и небольшие отколы бетона или раствора в узлах каркаса и в стыках панелей. Для ликвидации повреждений необходим капитальный ремонт здания.

Степень 3 – тяжелые повреждения. Разрушения неконструктивных элементов здания: обвалы частей перегородок, карнизов, фронтонов, дымовых труб. Значительные повреждения несущих конструкций: сквозные трещины в несущих стенах, значительные деформации каркаса, заметные сдвиги панелей, выкрашивание бетона в узлах каркаса. Возможен восстановительный ремонт здания.

Степень 4 – частичные разрушения несущих конструкций: проломы и вывалы в несущих стенах; разрывы стыков и узлов каркаса; нарушение связей между частями здания; обрушение отдельных панелей перекрытия; обрушение крупных частей здания. Здание подлежит сносу.

Степень 5 – обвалы. Обрушение несущих стен и перекрытий, полное обрушение здания с потерей его формы.

*Примечание:* в зданиях, возведенных с антисейсмическими мероприятиями, при оценке степени повреждения учитываются только повреждения несущих элементов конструкций.

## 4. Предметы быта

При оценке интенсивности сотрясения учитывается реакция только предметов быта, находящихся на первом или цокольном этажах здания.

### 4.1. Классификация

Тип П1 – свободно висящие предметы: лампы, люстры, легкие занавески и т.п.

Тип П2 – неустойчивые подвижные (незакрепленные) предметы: игрушки, флаконы, сувениры, высокая неустойчивая посуда и т.п.

Тип П3 – устойчивые подвижные предметы: посуда, бутылки, книги на полках, горшки с цветами, телевизоры и приемники на ножках, легкая мебель (стулья, легкие этажерки, ширмы, столики) и т.п.

Тип П4 – тяжелые подвижные предметы: телевизоры и тяжелые приемники на столах, стационарные магнитофоны, холодильники, тяжелая мебель (массивные столы, шкафы, комоды, стеллажи и т.п.).

Тип П5 – малоподвижные труднодвигаемые предметы: стенки, сейфы, массивные заполненные книжные шкафы, массивные "стенки" и т.п.

#### 4.2. Степень реакции $r_{п}$

Степень 0 – отсутствие реакции. Предметы не реагируют.

Степень 1 – слабая реакция. Предметы покачиваются незначительно.

Степень 2 – сильная реакция. Предметы заметно смещаются, разворачиваются, опрокидываются, падают.

### 5. Люди

При оценке интенсивности учитывается реакция только людей, находящихся на первом или цокольном этажах зданий.

#### 5.1. Классификация

Тип Л1 – чувствительные люди в помещении находятся в покое.

Тип Л2 – обычные люди в помещении (спящие, движущиеся или занятые физическим трудом) и люди вне помещений, находятся в покое.

Тип Л3 – активные люди вне помещений, идущие или занятые физическим трудом.

Тип Л4 – люди в движущемся транспортном средстве: за рулем автомашины, движущейся по хорошей дороге; пассажиры автобусов и пр.

Тип Л5 – люди, получившие в результате землетрясения травмы.

Тип Л6 – люди, погибшие в результате землетрясения.

#### 5.2. Степень реакции $r_{л}$

Степень 0 – отсутствие реакции. Люди не ощущают, не замечают, не реагируют.

Степень 1 – слабое ощущение. Люди ощущают легко, испытывают легкое недоумение, не меняют поведения; если спят – просыпаются спокойно, не сознавая причины; за рулем идущей машины – ощущают, но относят за счет неровностей дороги.

Степень 2 – сильное ощущение. Люди ощущают заметно, обращают внимание, могут оценить направление, продолжительность и отдельные фазы колебаний; если спят – просыпаются с ощущением, что их разбудили; за рулем идущей машины ощущают несоответствие поведения машины особенностям дороги.

Степень 3 – испуг. Люди пугаются, но могут оценить направление, продолжительность и отдельные фазы колебаний; за рулем пугаются, возникает мысль об аварии.

Степень 4 – сильный испуг. Люди сильно пугаются, стремятся выбежать из помещения, выбегают; за рулем в испуге останавливают машину.

Степень 5 – паника. Люди теряют равновесие, не могут стоять без опоры, впадают в паническое состояние, кричат, выбрасываются из окон и т.п.

Степень 6 – отключение. Люди полностью утрачивают осмысленность поведения, плохо реагируют на окружение, впадают в оцепенение, теряют сознание.

Степень 7 – травма.

Степень 8 – смерть.

## 6. Оценка средней степени реакции

При наличии данных по нескольким объектам средняя степень реакции  $r$  (жирным шрифтом будем обозначать средние значения) вычисляется по формуле:

$$\mathbf{r} = (\sum n_i r_i) / (\sum n_i),$$

где  $n_i$  – число объектов со степенью реакции  $r_i$ .

Ошибка оценки  $\sigma_r$  при этом вычисляется по формуле:

$$\sigma_r = \pm [(\sum n_i r_i^2 - r^2 \sum n_i) / \sum n_i \sum (n_i - 1)]^{0.5}.$$

При наличии данных по единичному объекту  $r$  за среднее значение принимается значение по единичному объекту, уменьшенное на 0.5

$$\mathbf{r} = r - 0.5,$$

где под  $r$  понимается  $r_d$ ,  $r_l$ ,  $r_n$  или  $r_n$ : индекс “д” означает, что рассматривается степень повреждения зданий, индекс “л” – реакция людей, индекс “п” – реакция предметов, индекс “и” – реакция инженерных сооружений.

Ошибки средних значений при этом равны:

$$\sigma_n = \pm 0.5; \quad \sigma_d = \pm 1; \quad \sigma_n = \pm 1.5; \quad \sigma_l = \pm 1.5.$$

При описании повреждений инженерных сооружений, для которых среднестатистические оценки не предусмотрены, под “отдельными случаями” понимается повреждение около 10%, под “многими” – до 50% от общего числа однотипных элементов (конструкций).

Отметим, что количество раненых и убитых является интегральной характеристикой.

## 7. Определение сейсмической интенсивности в баллах

### 7.1. Макросейсмические признаки

#### 1 балл – неощутимое землетрясение

Реакция людей:  $r_{л1} = 0.0$ .

Реакция предметов:  $r_{п} = 0.0$ .

#### 2 балла – едва заметное землетрясение

Реакция людей:  $r_{л1} = 0.0-0.1$ .

Реакция предметов:  $r_{п1} = 0.0-0.1$ .

#### 3 балла – слабое землетрясение

Реакция людей:  $r_{л1} = 0.2-0.5$ ,  $r_{л2} = 0.0-0.2$ .

Реакция предметов:  $r_{п1} = 0.2-0.4$ ,  $r_{п2} = 0.0-0.1$ .

Прочие признаки: колебания схожи с сотрясениями от движения легкого транспорта, часто не ощущаются как землетрясение.

#### 4 балла – ощутимое землетрясение

Реакция людей:  $r_{л1} = 0.6-1.6$ ,  $r_{л2} = 0.3-0.8$ ,  $r_{л3} = 0.0-0.1$ .

Реакция предметов:  $r_{п1} = 0.6-1.4$ ,  $r_{п2} = 0.2-0.4$ ,  $r_{п3} = 0.0-0.1$ .

Реакция зданий:  $r_{А1} = 0.0-0.2$ ,  $r_{А2} = 0.0-0.1$ .

Прочие признаки: колебания схожи с сотрясениями от движения тяжелого грузовика; дребезжание окон, стекол, шкафов, посуды; легкий скрип полов и стен; легкое колебание жидкости в открытых сосудах; толчок замечен в стоящих автомашинах.

#### 5 баллов – умеренное землетрясение

Реакция людей:  $r_{л1} = 1.7-2.9$ ,  $r_{л2} = 0.9-2.1$ ,  $r_{л3} = 0.2-1.1$ ,  $r_{л4} = 0.0-0.1$ .

Реакция предметов:  $r_{п1} = 1.5-2.0$ ,  $r_{п2} = 0.5-1.5$ ,  $r_{п3} = 0.2-0.4$ .

Реакция зданий:  $r_{А1} = 0.3-3.9$ ,  $r_{А2} = 0.2-0.5$ ,  $r_{Б} = 0.1-0.3$ ,  $r_{В,С7} = 0.0-0.1$ .

Прочие признаки: ощущается сотрясение здания в целом, животные беспокоятся, в отдельных случаях останавливаются маятниковые часы, распахиваются и захлопываются незапертые двери и окна, из наполненных открытых сосудов слегка выплескивается жидкость.

Явления на поверхности Земли. В отдельных случаях меняется дебит источников, в горных районах отдельные небольшие срывы камней.

#### 6 баллов – значительное землетрясение

Реакция зданий:  $r_{А1} = 1.0-2.2$ ,  $r_{А2} = 0.6-1.5$ ,  $r_{Б} = 0.4-0.8$ ,  $r_{В,С7} = 0.2-0.5$ ,  $r_{С8} = 0.1-0.3$ .

Реакция людей:  $r_{л1} = 3.0-4.1$ ,  $r_{л2} = 2.2-3.7$ ,  $r_{л3} = 1.2-2.7$ ,  $r_{л4} = 0.2-1.2$ .

Реакция предметов:  $r_{п2} = 1.6-2.0$ ,  $r_{п3} = 0.5-1.5$ ,  $r_{п4} = 0.0-0.4$ .

Повреждения инженерных сооружений. Небольшие смещения трубопроводов на опорах, возможны перекосы опор-стоек.

Явления на поверхности Земли. На сырых и мерзлых грунтах возможны видимые трещины шириной до 3 см; в горных районах возможны оползни малых и средних объемов, небольшие срывы камней; возможны изменения дебита источников и колебания воды в колодцах.

Прочие признаки: звон малых колоколов, домашние животные сильно беспокоятся, заметно сотрясаются деревья и кусты, заметно качание высоких столбов.

#### **7 баллов – сильное землетрясение**

Реакция зданий:  $r_{A1} = 2.3-3.5$ ,  $r_{A2} = 1.6-2.8$ ,  $r_B = 0.9-1.9$ ,  $r_{B,C7} = 0.6-1.2$ ,  $r_{C8} = 0.4-0.8$ ,  $r_{C9} = 0.1-0.4$ .

Реакция людей:  $r_{Л1} = 4.2-4.9$ ,  $r_{Л2} = 3.8-4.9$ ,  $r_{Л3} = 2.8-4.2$ ,  $r_{Л4} = 1.3-2.6$ . Оценки количества раненых и погибших, полученные вблизи порога чувствительности, соответственно, 0.05%–0.5% и 0.002%–0.02% от числа жителей. Отношение количества раненых и убитых от 10 до 60.

Реакция предметов:  $r_{П3} = 1.6-2.0$ ,  $r_{П4} = 0.5-1.5$ ,  $r_{П5} = 0.0-0.4$ .

Повреждения инженерных сооружений. Трещины в массивных неармированных конструкциях мостов и подпорных стенах из каменной кладки; трещины и сколы защитного слоя бетона в железобетонных опорах и путепроводах.

Отдельные трещины в твердом покрытии автомобильных дорог, осадка обочин земляного полотна, повреждения грунтовых насыпей, осыпи и камнепады на горных участках дорог, трещины в бетонных и малоармированных железобетонных массивных опорах надземных трубопроводов, значительные смещения и падение опор-стоек неглубокого заложения в мягких грунтах.

Деформации подземных трубопроводов, в т.ч. стальных со сварными стыками, в местах пересечения границ участков с резко отличающимися свойствами грунтов и в местах подсоединения трубопроводов к массивным сооружениям и установкам. Повреждения нежестких стыков трубопроводов, повреждение асбоцементных, бетонных и керамических трубопроводов, небольшие повреждения бетонных оросительных каналов.

Явления на поверхности Земли. В отдельных случаях оползни на крутых склонах, в горных районах обвалы камней; трещины в сырых и мерзлых грунтах шириной до 20 см, на замерших водоемах растрескивание, иногда торошение льда; в некоторых случаях исчезают или появляются новые источники воды.

Прочие признаки: на поверхности водоемов волны, вода мутнеет от ила, звонят большие колокола.



**8 баллов – очень сильное землетрясение**

Реакция зданий:  $r_{A1} = 3.6-4.4$ ,  $r_{A2} = 2.9-4.0$ ,  $r_B = 2.0-3.1$ ,  $r_{B,C7} = 1.3-2.2$ ,  $r_{C8} = 0.9-1.6$ ,  $r_{C9} = 0.5-1.0$ .

Реакция предметов:  $r_{п4} = 1.6-2.0$ ,  $r_{п5} = 0.5-1.5$ .

Реакция людей:  $r_{л1} = 5.0-5.6$ ,  $r_{л2} = 5.0-5.6$ ,  $r_{л3} = 4.3-5.4$ ,  $r_{л4} = 2.7-5.0$ . Оценки количества раненых и погибших, соответственно, 0.2% – 2.0% и 0.02% – 0.2% от числа жителей. Отношение количества раненых и убитых 4.5 – 25.

Повреждения инженерных сооружений. Осадки, наклоны и горизонтальные перемещения опор мостов, заложенных в слабых песчаных и глинистых грунтах. В отдельных случаях разрывы в массивных неармированных конструкциях мостов.

Оползание откосов и разрывы в твердом покрытии автомобильных дорог на участках, сложенных водонасыщенными песчаными грунтами; массовые повреждения насыпей; на горных участках дорог падение отдельных каменных глыб и небольшие ( $10^2-10^3$  м<sup>3</sup>) обвалы.

Значительные повреждения бетонных опор надземных трубопроводов, массовые перекосы, проседания, местами падение опор-стоек неглубокого заложения, искривление в плане вдоль продольной оси надземных и наземных трубопроводов. Разрушение стыков трубопроводов в местах смены грунтов и в местах подсоединения к массивным сооружениям. Разрушения нежестких стыков подземных трубопроводов, разрушения асбоцементных, бетонных, железобетонных и керамических трубопроводов; повреждения подземных стальных трубопроводов. Повреждения городских сетей стальных подземных трубопроводов.

Значительные повреждения бетонных оросительных сооружений. Повреждения гребней земляных плотин.

Явления на поверхности Земли. В сырых грунтах трещины шириной до 30 см, оползни на крутых склонах; в горных районах значительное число оползней и обвалов покровных и скальных грунтов объемом до  $10^5$  м<sup>3</sup>; осыпи и оползни лессовых грунтов на пологих склонах; во многих случаях изменение дебита источников и уровня воды в колодцах, иногда появляются новые водоемы; на замерзших водоемах сильное растрескивание и торошение льда; на низменных участках иногда во время землетрясения наблюдаются земляные волны.

В отдельных случаях в зоне активных разломов – сейсмостектонические трещины, иногда длиной до нескольких километров и с амплитудой до 10–20 см.

Прочие признаки: обламываются ветви деревьев.

**9 баллов – разрушительное землетрясение**

Реакция зданий:  $r_{A1} = 4.5-4.8$ ,  $r_{A2} = 4.1-4.6$ ,  $r_B = 3.2-4.1$ ,  $r_{B,C7} = 2.3-3.3$ ,  $r_{C8} = 1.7-2.6$ ,  $r_{C9} = 1.1-1.9$ .

Реакция предметов:  $r_{п5} = 1.6-2.0$ .

Реакция людей:  $r_{л1} = 5.7-5.9$ ,  $r_{л2} = 5.7-5.9$ ,  $r_{л3} = 5.5-5.8$ ,  $r_{л4} = 5.1-5.7$ . Реакция людей в целом плохо дифференцируется. Оценки количества раненых и погибших, соответственно, 1.0% – 6.0% и 0.2% – 2.0% от числа жителей. Отношение количества раненых и убитых 2–9.

Повреждения инженерных сооружений. Разрывы в опорах мостов, разрушение опорных частей, падение отдельных балочных разрезных пролетных строений; в отдельных случаях поворот в плане балочных неразрезных пролетных строений. Искривление жел.-дор. рельсов.

Разрывы и вспучивания в твердом покрытии автомобильных дорог и в верхнем строении полотна железных дорог. Значительные повреждения и отдельные разрушения насыпей, на горных участках дорог довольно большие ( $10^3-10^4 \text{ м}^3$ ) оползни и обвалы.

Значительные повреждения и разрушения большинства массивных бетонных и железобетонных опор надземных трубопроводов. Сброс трубопроводов с опор. Массовые разрушения нежестких стыков подземных трубопроводов. Массовые разрушения асбоцементных, бетонных, железобетонных и керамических трубопроводов; значительные повреждения (а на участках со сменой грунтов – разрушение) стальных трубопроводов. Массовые повреждения городских сетей стальных подземных трубопроводов.

Разрушения бетонных строительных сооружений. Опасные повреждения земляных плотин, заметные повреждения каменно-набросных и бетонных плотин.

Явления на поверхности Земли. Значительные повреждения берегов искусственных водоемов; в горных районах массовые оползни, обвалы, в т.ч. значительные (до  $10^5 \text{ м}^3$ ) массовые обвалы каменных бровок; в водонасыщенных грунтах массовые грязевые и песчаные вулканчики (грифоны) и просадки грунтов; во время землетрясения на ровных участках наблюдаются земляные волны. В зонах активных разломов часто имеются остаточные разрывные нарушения и сеймотектонические трещины длиной до нескольких десятков километров и с амплитудой до нескольких сантиметров.

**10 баллов – опустошительное землетрясение**

Реакция зданий:  $r_{A1} = 4.9-5.0$ ,  $r_{A2} = 4.7-4.8$ ,  $r_B = 4.2-4.6$ ,  $r_{B,C7} = 3.4-4.1$ ,  $r_{C8} = 2.7-3.8$ ,  $r_{C9} = 2.0-3.2$ .

Реакция людей:  $r_{л1} = 6.0$ ,  $r_{л2} = 6.0$ ,  $r_{л3} = 5.9-6.0$ ,  $r_{л4} = 5.8-6.0$ .

Реакция людей плохо дифференцируется. Оценки количества раненых и погибших: соответственно, 4% – 25% и 2% – 15% от числа жителей. Отношение количества раненых и убитых 1 – 5.

Повреждения инженерных сооружений. Сдвиг и обрушение надфундаментных частей массивных неармированных опор мостов; сдвиг по оголовкам железобетонных опор и падение многих балочных разрезных пролетных строений; опрокидывание отдельных секций многопролетных рамных виадуков.

Массовые разрушения насыпей, сбрасывание рельсошпальной решетки с земляного полотна железных дорог на склонах, большие ( $10^4$ – $10^5$  м<sup>3</sup>) обвалы на горных участках дорог, полное разрушение отдельных участков дорог оползнями.

Массовые разрушения надземных трубопроводов, разрушения магистральных подземных трубопроводов и городских сетей трубопроводов.

Опасные повреждения плотин и дамб.

Явления на поверхности Земли. Массовые обвалы и оползни, земляные лавины, грязевые потоки, грязевые извержения, фонтанирование грунта; значительные просадки водонасыщенных грунтов; наводнения. В зонах активных разломов сейсмоструктурные деформации длиной до ста километров и с амплитудой до нескольких метров; подбрасывание камней и валунов.

Площадь заметных нарушений на поверхности Земли 10 – 1000 км<sup>2</sup>.

### 11 баллов – катастрофическое землетрясение

Реакция зданий:  $r_{A2} = 4.9$ – $5.0$ ,  $r_B = 4.7$ – $5.0$ ,  $r_{B,C7} = 4.2$ – $4.7$ ,  $r_{C8} = 3.9$ – $4.6$ ,  $r_{C9} = 3.3$ – $4.4$ .

Повреждения инженерных сооружений. Массовые повреждения и разрушения инженерных сооружений: плотин, мостов, дорог, трубопроводов.

Явления на поверхности Земли. Большие деформации почвы, многочисленные крупные обвалы и оползни, видимые изменения рельефа, большие наводнения. В зонах активных разломов сейсмоструктурные нарушения длиной до нескольких сотен километров и с амплитудой свыше 10 м.

Площадь заметных нарушений на поверхности Земли  $10^2$  –  $10^4$  км<sup>2</sup>.

Оценка балльности требует специального исследования.

### 12 баллов – сильнейшая сейсмическая катастрофа

Повреждения инженерных сооружений и явления на поверхности Земли. Те же явления, что и при 11 баллах, но большей интенсивности и на большей площади:  $10^3$  –  $10^5$  км<sup>2</sup>.

## 7.2. Инструментальные инженерно-сейсмометрические данные

Корреляция пиковых ускорений  $A$ , скоростей  $V$ , колебательных смещений  $D$  и остаточных смещений  $D_0$  грунта с балльностью  $I$

$I$ , баллы	Измеренные величины			
	$A$ , см/с <sup>2</sup>	$V$ , см/с	$D$ , см	$D_0$ , см
2	0.7–1.7 (1.1)	0.029–0.086 (0.05)	0.00060–0.0028 (0.0013)	–
3	1.7–4.3 (2.8)	0.086–0.25 (0.15)	0.0028–0.014 (0.0062)	–
4	4.3–11 (6.8)	0.25–0.75 (0.44)	0.014–0.065 (0.030)	–
5	11–27 (18)	0.75–2.2 (1.3)	0.065–0.31 (0.14)	≤ 0,025
6	27–70 (44)	2.2–6.5 (3.8)	0.31–1.5 (0.68)	0.026–0.4 (0.1)
7	70–180 (110)	6.5–19 (11)	1.5–7.1 (3.3)	0.4–4.0 (1.2)
8	180–440 (280)	19–57 (33)	7.1–34 (16)	4.0–30 (11)
9	440–1090 (690)	57–170 (98)	34–164 (75)	30–160 (70)
10	–	–	–	161–600 (300)
11	–	–	–	601–1600 (1000)
12	–	–	–	> 1600

Примечания. 1. В скобках указаны значения медиан.

2. Нижняя граница интервалов ускорений, скоростей и смещений соответствует вероятности непревышения  $P_n = 0,25$ , а верхняя –  $P_n = 0,75$ .

3. Для оценки балльности по ускорениям грунта с учетом продолжительности колебаний, наблюдаемые значения ускорений умножаются на поправочный множитель  $K$ , зависящий от ширины импульса (длительности колебаний  $d$  на уровне 0.5 максимальной амплитуды):

$d$ , с	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	7.0	10	15	20	30	50
$K$	0.20	0.24	0.32	0.37	0.45	0.30	0.63	0.77	1.0	1.2	1.4	1.7	2.0	2.4	3.2

## 7.3. Сейсмологические данные

Интенсивность  $I$  в баллах по сейсмологическим данным (магнитуде по поверхностным волнам  $M_S$  и эпицентральному расстоянию  $R$ ) определяется в зависимости от тектонического строения на пути распространения сейсмических волн:

### Тектонически активные зоны

$M_s$	Эпицентральное расстояние, $R$ , км								
	≤ 45	46–80	81–130	140–200	210–270	280–350	360–440	450–540	550–640
≥ 8.2	10	10	9	8	7	6	5	4	3
7.5–8.1	9	9	8	7	6	5	4	3	2
6.8–7.4	8	8	7	6	5	4	3	2	–
6.1–6.7	7	7	6	5	4	3	2	–	–
5.4–6.0	6	6	5	4	3	2	–	–	–
4.7–5.3	5	5	4	3	2	–	–	–	–
4.0–4.6	4	4	3	2	–	–	–	–	–
3.3–3.9	3	3	2	–	–	–	–	–	–

## Платформы

$M_s$	Эпицентральное расстояние, $R$ , км						
	110–220	230–390	400–590	600–810	820–1100	1110–1400	1450–1750
$\geq 8.2$	9	8	7	6	5	4	3
7.5–8.1	8	7	6	5	4	3	2
6.8–7.4	7	6	5	4	3	2	–
6.1–6.7	6	5	4	3	2	–	–
5.4–6.0	5	4	3	2	–	–	–
4.7–5.3	4	3	2	–	–	–	–
4.0–4.6	3	2	–	–	–	–	–
3.3–3.9	2	–	–	–	–	–	–

#### 7.4. Осреднение интенсивности сотрясений, определенной по разным видам и типам объектов

При получении различной интенсивности по разным видам или типам объектов средняя интенсивность вычисляется по формуле:

$$I_i = \sum I_i / \sum f_i,$$

где  $I_i$  – интенсивность по некоторому типу объекта  $i$ , а  $f_i$  – весовая функция для данного типа объекта.

Значение весовой функции  $f_i$  определяется по формуле:

$$f_i = n_i / (k_i v),$$

где  $n_i$  – число обследованных объектов данного типа;  $v$  – видовой весовой коэффициент (для зданий принимается  $v = 1$ , для людей  $v = 2$ , для предметов  $v = 3$ );  $k_i$  – весовой переходный коэффициент, он назначается в зависимости от близости средней степени реакции объектов данного типа к порогу чувствительности или порогу насыщения, а именно:

$$k_i = 5 \quad \text{при } r_i \leq 0.2 \quad \text{и} \quad r_i \geq r_{i \max} - 0.2;$$

$$k_i = 2 \quad \text{при } 0.2 < r_i \leq 0.5 \quad \text{и} \quad r_{i \max} - 0.2 > r_i \geq r_{i \max} - 0.5;$$

$$k_i = 1 \quad \text{при } 0.5 < r_i < r_{i \max} - 0.5;$$

где  $r_i$  – среднее по данным наблюдений,  $r_{i \max}$  – максимальная степень реакции данного типа.

Для объектов, не имеющих в шкале переходных функций от  $r_i$  к  $I$ , принимается:  $k_i v = 2$  – для инженерных сооружений;  $k_i v = 10$  – для явлений на поверхности Земли,  $k_i v = 4$  – прочие признаки.

Полученное среднее значение интенсивности округляется до целых значений. При десятичных долях от 0.3 до 0.7 допускается округление до 0.5 балла (например, 8.5 баллов).

ТАБЛИЦА 1. Краткая характеристика интенсивности сотрясений по шкале MMSK-92

Краткое название землетрясения	$I$ , баллы	Типичные признаки интенсивности сотрясений
Неощутимое	1	Колебания грунта отмечаются только приборами.
Едва заметное	2	Колебания ощущаются в отдельных случаях людьми, находящимися в спокойном состоянии.
Слабое	3	Колебания отмечаются немногими людьми на первых этажах зданий, не замечаются людьми вне зданий.
Ощутимое	4	Колебания отмечаются многими людьми на первых этажах зданий, похожи на колебания, вызываемые движением тяжелого транспорта; не замечаются большинством спящих (просыпаются отдельные лица), не замечаются при ходьбе вне помещений. Возможно дребезжание стекол.
Умеренное	5	Колебания замечаются многими спящими (просыпаются). не замечаются многими людьми вне помещений. Ощущается сотрясение здания в целом, небольшое осыпание побелки, пыли из щелей. Качание висячих предметов.
Значительное	6	Колебания замечаются многими людьми вне помещений; в помещениях многие пугаются, выбегают. Трещины в штукатурке и перегородках во многих зданиях.
Сильное	7	Колебания замечают многие за рулем движущейся по асфальту автомашины. Сильный звон больших колоколов. Во многих домах повреждаются трубы, в капитальных стенах возникают тонкие трещины.
Очень сильное	8	Сквозные трещины в капитальных стенах, падение многих дымовых труб.
Разрушительное	9	Обвалы в некоторых зданиях хорошей постройки, обрушение стен, перекрытий, кровли.
Опустошительное	10	Обвалы многих зданий хорошей постройки; трещины в грунтах, оползни.
Катастрофическое	11	Обвалы подавляющего числа зданий хорошей постройки. Повреждения железных дорог, мостов, плотин. Многочисленные трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах.
Сильнейшая сейсмическая катастрофа	12	Полное разрушение всех сооружений. Большие изменения в рельефе.

*Примечание.* Оценка интенсивности по этой таблице может выполняться лишь в предварительном порядке и должна специально оговариваться в отчетных материалах в каждом отдельном случае.

ТАБЛИЦА 2. Сопоставление основных сейсмических шкал

JMA	0	–	1.0	1.1	1.8	<b>2.0</b>	–	2.4	–	<b>3.0</b>	3.1	–	3.8
MSK	1.0	1.3	1.9	2.0	<b>3.0</b>	3.4	3.8	<b>4.0</b>	4.6	4.9	<b>5.0</b>	5.5	<b>6.0</b>
MM	0.6	1.0	–	1.9	<b>3.0</b>	–	<b>4.0</b>	4.2	<b>5.0</b>	–	5.6	<b>6.0</b>	6.4
JMA	<b>4.0</b>	4.3	–	<b>5.0</b>	–	5.7	<b>6.0</b>	–	6.2	6.9	<b>7.0</b>	–	
MSK	6.5	<b>7.0</b>	7.8	<b>8.0</b>	8.5	<b>9.0</b>	9.6	9.7	<b>10</b>	<b>11</b>	11.3	<b>12</b>	
MM	–	<b>7.0</b>	<b>8.0</b>	8.4	<b>9.0</b>	9.5	–	<b>10</b>	10.2	<b>11</b>	–	<b>12</b>	

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены опорные оценки, относительно которых производятся пересчеты интенсивности в другие шкалы

ТАБЛИЦА 3. Определение сейсмической интенсивности (балльности)  $I$  по интервалам средней степени повреждения зданий

$I$ , баллы	Тип здания					
	A1	A2	B(B)	B(C), C7	C8	C9

В случае округления значений интенсивности до целых чисел

4	(0.0–0.3)	(0.0–0.2)	(0.0–0.1)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
5	0.3–1.0	0.2–0.6	0.1–0.4	(0.0–0.2)	(0.0–0.1)	(0.0)
6	1.0–2.3	0.6–1.6	0.4–0.9	0.2–0.6	0.1–0.4	(0.0–0.1)
7	2.3–3.6	1.6–2.9	0.9–2.0	0.6–1.3	0.4–0.9	0.1–0.5
8	3.6–4.5	2.9–4.1	2.0–3.2	1.3–2.3	0.9–1.7	0.5–1.1
9	4.5–4.9	4.1–4.7	3.2–4.2	2.3–3.4	1.7–2.7	1.1–2.0
10	(4.9–5.0)	4.7–4.9	4.2–4.7	3.4–4.2	2.7–3.9	2.0–3.3
11	(5.0)	(4.9–5.0)	(4.7–5.0)	4.2–4.8	3.9–4.7	3.3–4.5
12	(5.0)	(5.0)	(5.0)	(4.8–5.0)	(4.7–5.0)	(4.5–5.0)

В случае округления значений интенсивности до 0.5 балла

4	(0.1)	(0.1)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
4.5	0.2–0.4	(0.2)	(0.1)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
5	0.5–0.7	0.3–0.4	(0.2)	(0.1)	(0.0)	(0.0)
5.5	0.8–1.2	0.5–0.7	0.3–0.4	(0.2)	(0.1)	(0.0)
6	1.3–1.8	0.8–1.2	0.5–0.7	0.3–0.4	(0.2)	(0.1)
6.5	1.9–2.6	1.3–1.8	0.8–1.1	0.5–0.7	0.3–0.4	(0.2)
7	2.7–3.3	1.9–2.5	1.2–1.6	0.8–1.1	0.5–0.7	0.3–0.4
7.5	3.4–3.8	2.6–3.2	1.7–2.2	1.2–1.5	0.8–1.0	0.5–0.6
8	3.9–3.4	3.3–3.8	2.3–2.9	1.6–2.0	1.1–1.4	0.7–0.9
8.5	4.4–4.6	3.9–4.3	3.0–3.5	2.1–2.5	1.5–1.9	1.0–1.2
9	4.7–4.8	4.4–4.6	3.5–3.9	2.6–3.1	2.0–2.4	1.3–1.7
9.5	(4.9)	(4.7)	4.0–4.3	3.2–3.6	2.5–2.9	1.8–2.2
10	(5.0)	(4.8)	4.4–4.6	3.7–4.0	3.0–3.5	2.3–2.9
10.5	(5.0)	(4.9)	4.7–4.8	4.1–4.4	3.6–4.1	3.0–3.6
11	(5.0)	(5.0)	(4.9)	4.5–4.7	4.2–4.5	3.7–4.1
11.5	(5.0)	(5.0)	(5.0)	(4.8–4.9)	4.6–4.8	4.3–4.7
12	(5.0)	(5.0)	(5.0)	(5.0)	(4.9–5.0)	(4.8–5.0)

*Примечание.* В скобках указаны ненадежные оценки вблизи порогов чувствительности и насыщения.

ТАБЛИЦА 4. Интервалы реакции объектов шкалы на сейсмические воздействия

Тип объекта	Полный интервал реакции, баллы	Интервал реакции, близкой к линейной, баллы
Здания		
С9	6–12	8–11
С8	6–11	8–10
С7, В(С)	5–11	7–10
Б(В)	5–11	7–9
А2	4–10	6–8
А1	3–9	6–7
Люди		
Л6	8–11	8–11
Л5	8–11	8–11
Л4	5–9	6–8
Л3	4–10	5–8
Л2	3–10	5–7
Л1	2–10	4–7
Предметы		
П5	6–9	8
П4	6–8	7
П3	5–7	6
П2	4–6	5
П1	3–5	4

ТАБЛИЦА 5. Приоритеты видов объектов шкалы в порядке предпочтения при оценке сейсмической интенсивности (балльности)  $I$ 

$I$ , баллы	Вид объекта
2	Инструментальные данные, люди.
3	Инструментальные данные, люди, предметы.
4	Инструментальные данные, люди, предметы, здания.
5	Инструментальные данные, предметы, люди, здания, элементы ландшафта.
6	Инструментальные данные, предметы, здания, люди, инженерные сооружения, элементы ландшафта.
7	Инструментальные данные, здания, предметы, люди, инженерные сооружения, элементы ландшафта.
8	Инструментальные данные, здания, предметы, инженерные сооружения, элементы ландшафта, люди.
9	Инструментальные данные, здания, инженерные сооружения, элементы ландшафта, предметы, люди.
10–12	Здания, инженерные сооружения, элементы ландшафта.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Антикаев Ф.Ф. Замечания об инструментальной сейсмической шкале // Бюлл. инж. сейсмологии. 1972. N 7. 1972. С.31–35.
2. Антикаев Ф.Ф. О влиянии грунтовых условий на сейсмический эффект в Алматы по данным взрывов в Медео в 1965-1967 гг // Бюлл. инж. сейсмологии, 1973. N 8. С.55–62.
3. Антикаев Ф.Ф. Учет длительности колебаний при оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая интенсивность и методы ее измерения. 1975. С.234–239.
4. Антикаев Ф.Ф. Параметризация записей сейсмических колебаний // Вопр. инж. сейсмологии. 1981. Вып. 21. С.3–8.
5. Антикаев Ф.Ф. Проблемы создания шкалы сейсмической интенсивности нового поколения // Вулканология и сейсмология. 1999. N 4–5. С.23–28.
6. Антикаев Ф.Ф. Меры по снижению ущерба от землетрясений // Природные опасности России. Сейсмические опасности, Гл. 7. 2000. С.165–195.
7. Антикаев Ф.Ф., Гаипов Б.Н., Гарагозов Дж. Региональная шкала сейсмической интенсивности Туркменистана / Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Ашхабадского землетрясения. Ашхабад: Дамана. 1999. С.96–102.
8. Антикаев Ф.Ф., Гитис В.Г., Кофф Г.Л., Фролова Н.И. Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска (пособие для должностных лиц). М.: Центр БСТС, 1997. 54 с.
9. Антикаев Ф.Ф., Копничев Ю.Ф. Учет механизма очага при прогнозе параметров сильных движений // ДАН СССР. 1979. Т.247, N 4. С.822–825.
10. Антикаев Ф.Ф., Михайлова Н.Н. Некоторые корреляционные соотношения между параметрами сильных движений грунта // Бюлл. инж. сейсмологии, 1988. N 12. С.48–57.
11. Антикаев Ф.Ф., Михайлова Н.Н., Жунусов Т.Ж. и др. Проект стандарта для интенсивности землетрясения // Сейсмостойкое строительство. М.: ЭИ ВНИИНТПИ, 1996. Вып.5. 10 с.
12. Антикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта // Вопр. инж. сейсмологии. 1989. Вып. 29. С.98–108.
13. Антикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Генерирование искусственных акселерограмм методом масштабирования реальных записей // Физика Земли. 2002. N 7. С.39–45.
14. Баранников Л.Б., Борисов Н.С., Ершов И.А. и др. Макросейсмическое обследование землетрясений Средней Азии и Казахстана // Сильные землетрясения Средней Азии и Казахстана. Вып. 1. Душанбе: Дониш, 1970. С.94–118.
15. Белоусов Т.П., Теремецкий А.Л. Оценка макросейсмического эффекта сильных землетрясений в пустынных областях (на примере Газлийского землетрясения 1984 г.) // Вопр. инж. сейсмологии. 1987. Вып. 28. С.146–152.
16. Богданов В.И., Грайзер В.М., Шебалин Н.В. Определение истинного движения и остаточного смещения почвы по сейсмограммам повторных толчков сильных землетрясений // Вопр. инж. сейсмологии. 1978. Вып. 19. С.98–107.
17. Бузруква Д.И., Шебалин Н.В. Физические особенности затухания сотрясений на территории регионов Средняя Азия – Казахстан и Крым – Кавказ – Туркмения // Вопр. инж. сейсмологии. 1980. Вып. 20. С.25–36.
18. Васильев Ю.И. и др. Механические свойства мягкого грунта // Сейсмическое микрорайонирование. 1977. С.121–128.

19. Газлийское землетрясение 1976 г. Инженерный анализ последствий. М.: Наука, 1982. 196 с.
20. *Гарагозов Д., Ершов И.А., Попова Е.В.* Макросейсмическое обследование землетрясений 14 марта 1983 г. на территории пос. Кум-Даг // *Вопр. инж. сейсмологии.* 1985. Вып.26. С.27–46.
21. *Гвishiани А.Д., Жижин М.Н., Тумаркин А.Г. и др.* Распознавание интенсивности по динамическим параметрам акселерограмм // *Вопр. инж. сейсмологии.* 1988. Вып. 29. С.62–73.
22. *Гехман А.С.* Об оценке интенсивности землетрясений по степени повреждаемости трубопроводов // *Вопр. инж. сейсмологии.* 1985. Вып. 26. С.171–179.
23. *Горшков Г.П., Шенкарева Г.А.* О корреляции сейсмических шкал // *Тр. ИФЗ АН СССР.* 1958. Т.168. N 1.
24. *Грайзер В.М.* Истинное движение почвы в эпицентральной зоне. М.: ИФЗ. 1983. 198 с.
25. *Грайзер В.М., Молотков С.Г.* Анализ акселерограмм сильных движений землетрясения 15 октября 1979 г. в Импириал Вэлли // *Вопр. инж. сейсмологии.* 1983. Вып. 24. С.62–73.
26. *Долгополов Д.В., Плетнев К.Г.* Метод распознавания величины балла по сейсмограмме // *Вопр. инж. сейсмологии.* 1978. Вып. 19. С.88–97.
27. *Ершов И.А.* Дополнения к шкале сейсмической интенсивности // *Вопр. инж. сейсмологии.* 1982. Вып. 22. С.144–151.
28. *Ершов И.А., Попова Е.В.* Каталог макросейсмических данных, собранных на территории г. Газли (землетрясение 19 (20) марта 1984 г.). М.: ИФЗ, 1985.
29. *Ершов И.А., Шебалин Н.В.* Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов // *Вопр. инж. сейсмологии.* 1984. Вып. 25. С.78–95.
30. *Карцивадзе Г.Н.* Сейсмостойкость дорожных инженерных сооружений. М.: Транспорт, 1974. 263 с.
31. *Кондорская Н.В., Шебалин Н.В.* (отв. ред.). Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 581 с.
32. *Кулиев Ф.Т., Шебалин Н.В.* О возможности статистической интерпретации балльности // *Сильные землетрясения Средней Азии и Казахстана.* Вып. 1. Душанбе: Дониш, 1970. С.94–118.
33. *Леонов Н.Н.* Природные явления в шкале сейсмической интенсивности // *Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности.* 1975. С.132–138.
34. *Мартемьянов А.И., Ширин В.В.* Оценка интенсивности землетрясения 8 апреля в Газли по описательной части некоторых вариантов сейсмических шкал // *Газлийское землетрясение 1976 г. Инженерный анализ последствий.* 1982. С.104–112.
35. *Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962. 280 с.
36. *Медведев С.В.* Международная шкала сейсмической интенсивности // *Сейсмическое районирование СССР.* 1968. С.158–162.
37. *Медведев С.В.* Определение интенсивности землетрясений // *Вопр. инж. сейсмологии.* 1978. Вып. 19. С.108–116.
38. *Напетваридзе Ш.Г., Гехман А.С., Спиридонов В.В. и др.* Сейсмостойкость магистральных трубопроводов и других специальных сооружений нефтяной и газовой промышленности. М.: Наука, 1980. 172 с.
39. *Окамото Ш.* Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат, 1980. 342 с.
40. *Онофраш Н.И., Роман А.А.* Количественная интерпретация макросейсмического поля. Кишинев: Штиинца, 1979. 64 с.

41. *Плетнев К.Г., Роман А.А., Шебалин Н.В.* Корреляция между параметрами колебаний и балльностью по данным повторных толчков Дагестанского землетрясения 1970 г. // Бюлл. инж. сейсмологии. 1975. № 9. С.5–14.
42. *Поляков С.В., Жаров А.М., Мартельянов А.И., Шурин В.В.* Статистический анализ повреждений // Газлийское землетрясение 1976 г. Инженерный анализ последствий. 1982. С.104–112.
43. *Пфанцагель И.* Теория измерений. М.: Мир, 1976. 248 с.
44. *Рашидов Т.* Определение балльности землетрясений по признакам повреждений и разрушений подземных трубопроводов // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. 1975. С.117–120.
45. Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1975. 280 с.
46. СНиП II-7-87\*. Строительные нормы и правила. Часть II, глава 7. Строительство в сейсмических районах. М.: Госстрой России, 2000.
47. *Соломенко В.П.* Шкала балльности по сейсмодислокациям // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. 1975. С.121–131.
48. *Супнес П., Зинес Дис.* Основы теории измерений // Психологические измерения. М.: Мир, 1967. С.9–110.
49. *Ципенюк И.Ф.* Повреждаемость и надежность крупнопанельных зданий при сейсмических воздействиях // Вопр. инж. сейсмологии. 1988. Вып. 29. С.141–153.
50. *Чернов Ю.К., Соколов В.Ю.* Некоторые соотношения между параметрами колебаний грунта и макросейсмической интенсивностью землетрясения // Вопр. инж. сейсмологии. 1983. Вып. 24. С.96–107.
51. *Шебалин Н.В.* Методы использования инженерно-сейсмологических данных в сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. 1968. С.95–111.
52. *Шебалин Н.В.* Макросейсмическое поле и очаг сильного землетрясения. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук: М.: ИФЗ, 1969.
53. *Шебалин Н.В.* Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. 1975а. С.87–109.
54. *Шебалин Н.В.* Распределение степеней повреждения зданий и использование его для оценки балльности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. 1975б. С.253–265.
55. *Шерман С.И., Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Аптикаев Ф.Ф.* Региональная шкала сейсмической интенсивности для Прибайкалья (РШСИ-2000). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2000. 33 с.
56. *Шестоперов Г.С.* Сейсмостойкость мостов. М.: Транспорт, 1984. 143 с.
57. *Шумила В.И.* Статистические методы интерпретации и прогноза поля сейсмической интенсивности. Кишинев: Штиинца, 1983. 103 с.
58. *Аптикаев F.F.* The parametrization of ground motion. Proc. of the General Assembly IASPEI. Tokyo, Japan. 1985. Abstracts, Vol.2.
59. *Аптикаев F.F., Frolova N.I., Ugarov A.N.* Extreme and average number of death and injuries for risk assessment // Proc. of the IASPEI Assembly. Thessaloniki, Greece. 1997.
60. *Аптикаев F.F., Kopnischev Yu. F.* Correlation of strong ground motion parameters with earthquake mechanism. Proc. VII WCEE. Istanbul, Turkey. 1980. Geosci. Aspects. Pt.1, Vol.1. P.107–110.
61. *Bottari A., Corsanego A., Lo Guidice E.* Some problems on the MSK-scale application: Regionalization of the scale and its field use // Boll. Geof. Teor. Appl. 1985. Vol. XXVII, N 108. P.303–315.

62. *Bottari A., Corsanego A., Lo Guidice E., Mangeri M.* Some problems in the MSK-scale applications: Use of the quantitative definitives in detailed damage assessment // *Ann. Geophys. B.* 1986. Vol.4, N 2. P.191–200.
63. *Grunthal G.* (ed.). European macroseismic scale 1998. Luxembourg, 1998. 101 p.
64. *Kenjebaev E.* Proposals for up-dating of the MSK intensity scale // *Thoughts and proposals for up-dating of the MSK intensity scale.* Potsdam. 1989. P.33–37.
65. *Medvedev S.V.* Seismic Intensity Scale MSK-76 // *Inst. Geophys. Polish. Acad. Sci.* 1977. A-6 (117). P.95–102.
66. *Mikhailova N.N., Aptikaev F.F.* Some correlation relations between parameters of seismic motions // *J. Earthq. Predict. Res.* 1996. Vol.5, N 5. P.257–267.
67. Minutes of the meeting of the working group "Macroseismic scales" of the European seismological commission. Zurich. 1990. P.1–8.
68. *Prochazkova D., Shenkova Z.* Intensity growth with the height and flow of the building-example of the Friuli earthquake // *Gerl. Beitr. Geophys. Leipzig.* 1981. Vol.90, N 3. P.241–246.
69. Report on the Ad-hoc Panel Meeting of experts on up-dating of the MSK-64 seismic intensity scale. Jena, 10–14 March, 1980 // *Gerl. Beitr. Geophys. Leipzig.* 1981. Vol.90, N 3. P.261–268.
70. *Schenkova Z., Prochazkova D.* Determination of representative intensity values of individual localities // *Gerl. Beitr. Geophys. Leipzig.* 1981. Vol.90, N 3. P.225–230.
71. *Schenk V., Schenkova Z.* Relation between intensity and ground motion parameters – review and generalization // *Gerl. Beitr. Geophys. Leipzig.* 1981. Vol.90, N 3. P.247–254.
72. *Sponheuer W., Bormann P.* Introduction to the up-dating of the seismic scale MSK-64 // *Gerl. Beitr. Geophys., Leipzig.* 1981. Vol.90, N 3. P.213–216.
73. *Thoughts and Proposals for up-dating of the MSK intensity scale.* Centr. Inst. Phys. Earth. Potsdam. 1989. 69 p.
74. *Velkov M.* The Armenia – USSR earthquake, December 7, 1988. *Inst. Earthq. Eng. and Eng. Seism. Skopje.* 1989. 70 p.