

даже такой аппаратурой в Байкало-Монгольском сейсмическом поясе практически отсутствуют. В целом, в этой ситуации перспективы совершенствования прогноза сейсмической опасности и воздействий возможны на основе предлагаемых экспериментально аналитических методик, согласующихся с физикой разрушений и пластичности, и статистического подхода к оценкам интенсивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голенецкий С.И., Мыльникова Г.Л. Сейсмическая сотрясаемость юго-западного Прибайкалья // Сейсмические исследования в Восточной Сибири. М., Наука, 1981, с.62-71.
2. Иванов Ф.И. Интенсивность и сейсмическое воздействие землетрясений в условиях структурной неоднородности среды. Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1998, 30с.
3. Иванов Ф.И., Потапов В.А. Введение в инженерную сейсмологию (нелинейные приближения). Иркутск, Изд-во Иркутского университета, 1994, 84с.
4. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР, 1941, т.31, с. 538-541.
5. Медведев С.В. Определение интенсивности землетрясений // Эпицентральная зона землетрясений. М., Наука, 1978, с. 108-117.
6. Николаев А.В. Сейсмика неоднородных и мутных сред. М., Наука, 1973, 173 с.
7. Нурмагамбетов А. Сейсмичность и сейсмическая опасность территории Казахстана: Дис. ... д-ра геол.минер. наук в форме научного доклада. Иркутск, 1993, 62 с.
8. Потапов В.А., Иванов Ф.И. Проблемы количественной оценки сейсмических воздействий в плейстоценовых областях сильных землетрясений // Геология и геофизика, 1998, т.39, 8, с.1141-1150.
9. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Радионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды // Вестник АН СССР, 1983, №1, с. 32-88.
10. Шебалин Н.В. Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М., Наука, 1975, с. 87-109.
11. Штейнберг В.В. и др. Методы оценки сейсмических воздействий // Задание сейсмических воздействий, М., 1993, с. 5-94.
12. Чельницкий В.В. Прогноз амплитуд скоростей и ускорений колебаний в зависимости от магнитуды землетрясений и расстояния до Иркутска // Сейсмический риск и сейсмическое микрорайонирование. Иркутск, 1994, с.20-22..

С.И. Шерман, Ю.А. Бержинский, В.А. Павленов
Иркутск, Институт земной коры СО РАН

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ШКАЛЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

1. Введение

Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64 перестала удовлетворять современным требованиям, поскольку она базируется на устаревшей классификации типов зданий и сооружений, не отражает изменений в структуре городской застройки и последних достижений в области сейсмостойкого строительства, а также результатов инженерного анализа последствий землетрясений за последние годы.

В Институте земной коры СО РАН в рамках целевой программы "Сейсмобезопасность Иркутской области" разрабатывается региональная шкала сейсмической интенсивности (РШСИ). Зона действия региональной шкалы охватывает Прибайкалье и Забайкалье, а также западный участок БАМ.

2. Современное состояние проблемы и требования к РШСИ

Многие годы в нашей стране для оценки сейсмической интенсивности успешно применялась шкала MSK-64. Предложенная для опытного применения Европейская макросейсмическая шкала EMS-92 не пригодна без определенной корректировки для применения в конкретных условиях Восточной Сибири [1]. В 1998 году предложена новая версия этой шкалы EMS-98 [2]. Ее неприспособленность для непосредственного использования в Восточной Сибири обуславливается некоторыми конструктивными особенностями наших зданий и сооружений, инженерно-геологическими условиями региона и некоторыми другими контрастными характеристиками. По этой причине начали и успешно разрабатываются проекты территориальных стандартов для оценки интенсивности землетрясений для конкретных регионов [3]. Трудности практического использования стандартных шкал в региональных условиях послужили достаточным основанием для начала работ по разработке региональной шкалы сейсмической интенсивности. Она должна базироваться на общепринятых в мировой практике стандартах и одновременно учитывать региональные особенности территорий [4]. Последнее особенно важно. По существу все известные шкалы в основном акцентируют внимание на констатационной части и фиксируют результаты сейсмических событий постфактум. Современная шкала должна содержать прогнозную часть, опирающуюся на количественные или полуколичественные критерии.

3. Структура региональной шкалы

По структуре РШСИ состоит из трех разделов: макросейсмического, инструментального и геодинамического, последний из которых объединяет группу факторов и их экспертные оценки. Расчет потенциальной (прогнозной) сейсмической интенсивности осуществляется путем отдельного подсчета оценок по трем разделам (макросейсмическому, инструментальному и геодинамическому). Окончательная прогнозная оценка региона дается по максимальному значению суммы экспертных оценок, набранных по одному из разделов.

3.1. Макросейсмическая часть региональной шкалы

Новые подходы к проблеме построения макросейсмической части РШСИ могут быть получены за счет использования понятия траектории состояния, введенного при разработке СНиП II-7-81 [5]. С использованием введенного понятия могут быть получены результаты, полезные для классификации типов зданий по уровню их сейсмоусиления. Если в качестве параметра δ , характеризующего состояния системы, принять степень повреждения d , то уравнение траектории состояния может быть получено из сейсмической шкалы, например,

из MSK-64. Общий вид уравнения траектории состояния $J = J(\delta, S)$ может быть принят в форме:

$$\ddot{Y}_0 = a \times e^{b\bar{d}}, \quad (1)$$

где \ddot{Y}_0 - ускорение основания; \bar{d} - средняя степень повреждения; a, b - подлежащие определению параметры.

Воспользовавшись формулой Н.В. Шебалина [6] для перехода от максимальной степени повреждения к средней $d = d_{\max} - 1.4$ (при величине стандарта $\sigma = 0.64$) и данными шкалы MSK-64, получим следующие уравнения траекторий состояния:

для типов зданий:

$$\begin{aligned} \text{А} \quad Y_0 &= a e^{0.69d} \\ \text{Б} \quad Y_0 &= 2a e^{0.69d} \\ \text{В} \quad Y_0 &= 4a e^{0.69d}, \quad \text{где } a = 16.5 \text{ см/с}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрение полученных уравнений приводит к выводу: все типы зданий без антисейсмических мероприятий **А, Б и В** описываются одной и той же траекторией состояния вида $Y_0 = a e^{0.69d}$, сдвинутой последовательно на целую единицу степени повреждения, что отражает известное свойство равномерности шкалы MSK-64. В системе координат "интенсивность в баллах J - средняя степень повреждений d " траектории состояния для зданий типа А, Б и В имеют вид параллельных прямых, которые описываются единым уравнением вида:

$$d = J - i + 0.6 \quad (3)$$

где i - уровень сейсмоусиления в баллах: 5, 6 и 7 баллов соответственно для типов А, Б и В.

Используя уравнения траектории состояния можно построить сквозную классификацию типов зданий, вне зависимости от уровня их сейсмоусиления, в т.ч. и без антисейсмических мероприятий, на единой методической основе, где все типы зданий по обоим шкалам - EMS-92 и MSK-64 - могут быть упорядочены по единому количественному параметру i - уровню сейсмоусиления (табл. 1).

Таблица 1

| Шкала | Типы зданий (классы уязвимости) | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|---|---|------|------|---|------|---|---|
| MSK-64 | | | | | | В | | Б | А |
| EMS-92 | F | E | D | ASD9 | ASD8 | C | ASD7 | B | A |
| уровень с/усил. | 10 | 9 | 8 | 7.6 | 7.1 | 7 | 6.6 | 6 | 5 |

Отметим, что в основу представленной в табл. 1 единой классификации типов зданий как с сейсмоусилением, так и без него фактически положена матрица повреждаемости зданий. Однако в общем случае линейные траектории состояний в системе координат " $J - d$ " для сейсмостойких зданий не будут параллельны между собой: чем выше уровень сейсмоусиления, тем больше будет величина углового коэффициента, соответствующей траектории состояния.

Обработка статистических данных о повреждаемости крупнопанельных и каменных зданий с различным уровнем сейсмоусиления, выполненная И.Ф. Ципенюком [7], показала, что интервал степеней повреждений с ростом уровня сейсмоусиления сужается для сейсмостойких зданий. Последнее совершенно не учитывается шкалой EMS-92. Общий вид траекторий состояния зданий с различным уровнем сейсмоусиления может быть представлен в форме:

$$\bar{d} = (a_1 + a_2 \times i)J + a_3 \times i + a_4, \quad (4)$$

где J - интенсивность сейсмического воздействия в баллах; i - уровень сейсмоусиления здания в баллах; a_1, a_2, a_3, a_4 - коэффициенты, зависящие от типа здания, которая позволяет оценить влияние уровня сейсмоусиления i на угловой коэффициент линейной траектории состояния

$(a_1 + a_2 i)$. Очевидно, что с увеличением уровня сейсмоусиления коэффициент $(a_1 + a_2 i)$ при координате J будет возрастать и, следовательно, траектория состояния, смещаясь на плоскости $J - d$ влево, будет разворачиваться против часовой стрелки. Зависимость (3) для шкал MSK-64 и EMS-92 является частным случаем уравнения (4), при котором

$$(a_1 + a_2 i) = 1, \quad a_3 = -1 \quad \text{и} \quad a_4 = 0.6.$$

Уязвимость определяется как отношение стоимости ремонта (восстановления) повреждённого здания к общей стоимости объекта. Уязвимость изменяется от 0 - отсутствие повреждений до 1.0 (или 100%) при полном обрушении здания. Ранжирование зданий предлагается принять на основе количественного параметра в виде отношения разности между первичными убытками (в процентах) здания базового типа Б (кирпичное здание) и такими же убытками здания любого другого типа: А, В, С7, С8, С9 или С10 к расчетному уровню ускорения основания f_i , выраженному в m/c^2 $r = (\rho_i^B - \rho_i) / f_i$ (5)

Расчетное ускорение основания f_i принимает значения 1,2,4 и 8 соответственно для $i = 7, 8, 9$ и 10 баллов. По существу разность первичных убытков относится к 7-балльному уровню, т.к. $f_7 = 1$. В таблице 2 приведены количественные значения относительного параметра применительно к версии шкалы MMSK-92.

Таблица 2

| Тип | С10 | С9 | С8 | В | С7 | Б | А |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-------|
| г % | 8.8 | 7.8 | 6.8 | 5.8 | 4.8 | 0 | -11.0 |

Таким образом, типы зданий, уровень сейсмоусиления которых выше чем у типа Б, имеют показатель $r > 0$, ниже типа Б: $r < 0$ и $r = 0$ для самого типа Б.

Большое значение в региональной шкале придается созданию опорной сети зданий-представителей [8]. Общее количество объектов в опорной сети, создаваемой в сейсмических районах Иркутской области, оценивается примерно в 500-600 зданий, а на территории Бурятии около 200 зданий. При работах по созданию опорной сети зданий-представителей в полной мере проявились преимущества регионально-масштаба РШСИ, что позволяет существенно по-

высить надежность и точность макросейсмических оценок. По существу создаваемая опорная сеть зданий - представителей служит материальной основой макросейсмической части региональной шкалы.

3.2. Инструментальная часть региональной шкалы

В обзоре Ф.А. Аптикаева [9] приведены формулы, связывающие амплитуды смещений, скоростей и ускорений с балльностью. Расчеты по этим формулам показывают, что разброс амплитуд ускорений при одном и том же балле может достигать десятков и сотен раз. Это говорит о том, что применение однопараметрических количественных шкал для всего земного шара, по крайней мере, на сегодняшний день невозможно. Результаты теоретических исследований, а также анализ инструментальных и макросейсмических данных позволяют выделить следующие важные с инженерной точки зрения параметры воздействий: амплитудный уровень колебаний; длительность процесса колебаний; спектральный состав колебаний; остаточные смещения грунтов.

В то же время, одинаковая сейсмическая интенсивность может наблюдаться при различных комбинациях параметров сейсмических колебаний. На параметры сейсмических колебаний влияют такие факторы, как глубина и тип механизма очага землетрясений, геологические условия в пункте измерения и на пути от очага к этому пункту, а они для разных сейсмических районов различные. Эти особенности следует учитывать при построении региональной шкалы сейсмической интенсивности (РШСИ) [10]. Создание РШСИ для Прибайкалья сдерживается, прежде всего, отсутствием инструментальных данных по сильным землетрясениям и ограниченным их количеством по слабым, ощутимым землетрясениям интенсивностью 2-5 баллов, полученным лишь в последние десятилетия. К настоящему времени банк данных по сильным движениям в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) содержит более 200 записей землетрясений интенсивностью 2-4 балла. Это в основном записи скоростей смещений колебаний грунтов.

На основе полученных данных была разработана инструментальная часть региональной шкалы сейсмической интенсивности [12].

Предлагается оценивать сейсмическую интенсивность по формуле [14]:

$$P_{\geq I} = I - \exp - [0,037(x \times 2^{(I-6)} - 14)^2], \quad (6)$$

где P - вероятность появления события соответствующей балльности (7, 8 и 9), x - ускорение грунта, I - балл сейсмической шкалы.

В качестве расчетного значения интенсивности сейсмического воздействия принимается его математическое ожидание, равное

$$I_m = \sum I_i P_x \quad (7)$$

После уточнения балльности прогнозируемого землетрясения по формуле (6), используя данные Ф.Ф. Аптикаева [13], оценивается расчетная балльность.

3.3. Геодинамическая часть региональной шкалы

Одним из принципиально новых моментов построения РШСИ является введение в нее группы геодинамических факторов. Группы объединяет геологические, тектонические, неотектонические, инженерно-геологические, гидрогео-

логические и геоморфологические факторы, которые, в свою очередь, при необходимости детальнее классифицируются на более частные показатели. Это увеличивает количество факторов оценки сейсмической интенсивности и, главное, расширяет возможности шкалы, дополняя её констатационный характер возможностями прогноза на количественном или полуколичественном уровнях.

Трансформация тектонических, инженерно-геологических и др. факторов в количественную форму при сейсмическом районировании практически не разработана. Предлагается для экспресс оценки потенциальной сейсмической опасности и устойчивости территории [17] с точки зрения пригодности её для социального освоения воспользоваться группой геодинамических факторов (табл.3), которые, с одной стороны, восполняют пробелы в действующих сейсмических шкалах при оценке влияния сложной геолого-геофизической и инженерно-геологической среды и повысят степень точности оценки, с другой стороны, внесут в шкалу элементы сейсмического и геодинамического прогноза длительной устойчивости, стабильности территории.

В основе инженерно-геологических факторов лежат типы пород, их крепость или комплексы пород. Основным показателем является крепость горных пород f (пород по Протодьяконову. Она определяется при испытании горных пород на сжатие: $f = \sigma/100$ (см. табл.). Экспертная оценка для каждой породы определялась как $100/f$. Предлагается выделить 6 комплексов пород, отличающихся своей крепостью f . В данном случае показатель f определяется нами как средняя крепость из типов пород, входящих в комплекс. На прочностные константы массивов горных пород существенное влияние оказывает степень тектонической деструкции региона - количество разломов длиной более 1 км на 1 км^2 или м^2 .

Опыт работ в Восточной Сибири показывает, что исследование на 10-ти метровые глубины по вертикальному разрезу недостаточно. Уровень глубин и сложность вертикального разреза необходимо учитывать. По этой причине в РШСИ вводится показатель, отражающий вертикальную структуру разреза. Существенное влияние на прочностные свойства геологического основания оказывает степень обводнённости горных пород и положение верхнего уровня грунтовых вод. РШСИ предусматривает три границы уровня грунтовых вод, минимальный из которых принят равным 5 метрам или менее. Экспертная оценка для этого уровня принята максимальной, соответствующей приращению сейсмичности на 1 балл, для каждого последующего она уменьшается в логарифмическом масштабе. Громадное, подчас определяющее значение при региональном или макросейсмическом районировании имеют экзогенные процессы. В РШСИ, исходя из условий Прибайкалья, предусмотрено принимать во внимание четыре крупных процесса: закарстованность, оползни, просадочные и криогенные явления. Экспертные оценки для них, в отличие от выше описанных примеров, определены и растут по линейному закону, достигая максимальных значений при развитии территорий или интенсивном развитии оползней.

| Геодинамические факторы | Характеристика | Экспертная оценка |
|------------------------------------|---|-------------------|
| 1. Степень деструкции | Количество разломов с $L > 1 \text{ км/км}^2$ | 0.02-30 |
| 2. Структура вертикального разреза | Однородный, слоистый, сложный с переслаивающимися породами разной прочности | 4-16 |
| 3. Комплексы горных пород | Осадочные, вулканогенно-осадочные, метаморфические, магматические | 5-33 |
| 4. Обводненность разреза | Уровни грунтовых вод | 10-20 |
| 5. Экзогенные процессы | Закарстованность, оползни, просадочные и криогенные явления | 20-30 |

В табл.4 приведена общая схема оценки относительной стабильности территорий на базе предлагаемой РШСИ и ее соотношение с балльностью по другим 12-ти балльным шкалам.

Таким образом, интегральный учет геодинамических факторов позволил не только уточнить исходную балльность территорий, но и выполнить функции прогноза. При таком построении РШСИ: 1.сохраняет преемственность с известными шкалами по уже достигнутым и оправдавшим себя наработкам; 2. существенно усиливает не только констатационную, но и прогнозную функцию, которую должна нести региональная шкала; 3.сохраняет единый количественный принцип оценки факторов, лежащих в основе шкалы; 4. позволяет сопоставлять констатирующую и прогнозную части шкалы; 5. предлагает качественную прогнозную оценку регионов по степени относительной стабильности территорий и их потенциальной приемлемости для освоения.

Таблица 4.

| Сейсмическая интенсивность в баллах по MSK-64, EMS-92, EMS-98 | Сумма экспертных оценок по геодинамическим факторам | Относительная устойчивость территорий для прогноза необходимой сейсмостойкости сооружений |
|---|---|---|
| 12 | 240 | весьма неустойчивая (не пригодна) |
| 11 | 220 | |
| 10 | 200 | весьма неустойчивая |
| 9 | 180 | |
| 8 | 160 | неустойчивая |
| 7 | 140 | |
| 6 | 120 | устойчивая |
| 5 | 100 | |
| 4 | 80 | весьма устойчивая |
| 3 | 60 | |
| 2 | 20 | весьма устойчива |

По данным табл.3 и 4, являющимися базовыми для геодинамической части разрабатываемой РШСИ, сделана тестовая оценка балльности для территории г. Иркутска и его окрестностей. Результаты сопоставлены с картой сейсмического микрорайонирования, проведенного Восточно-Сибирским трестом инженерно-строительных изысканий. Они оказались удовлетворительными и дают основание для более глубокой разработки комплексной методики построения РШСИ.

4. Заключение

В статье освещены основные проблемы, связанные с построением региональной шкалы сейсмической интенсивности, и намечены пути их решения. Как отмечено, региональная шкала носит интегральный характер: интенсивность произошедшего землетрясения определяется по совокупности факторов, полнота и достоверность которых неоднородны. По существу вопрос об интегральной оценке балльности по совокупности учитываемых факторов сводится к вопросу объединения макросейсмических, инструментальных и геодинамических признаков в одно пространство. Оно известно как проблема изоморфизма макросейсмической и инструментальной частей сейсмической шкалы [18]. Включение в региональную шкалу широкого набора геодинамических факторов способствовало приданию ей дополнительного оценочного и прогнозного характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. *European Macroseismic Scale 1992 (up-date MSK-scale) // Edit. G.Grunthal. Luxembourg. 1993. 79 pp.*

2. *European Macroseismic Scale 1998. EMS-98.* // Edit. G.Grunthal. Luxembourg. 1998. 99 pp.
3. Антикаев Ф.Ф., Жунусов Т.Ж., Ашимбаев М.У., Ицков И.Е., Михайлова Н.Н., Таубаев А.С. Проект стандарта для оценки интенсивности землетрясений. // Экспресс-информация "Сейсмостойкое строительство". ВНИИНТПИ, М. Вып. 5, 1996, с. 12-20.
4. Rashutina N.V., Sherman S.I., Berzhinsky Yu.A., Pavlenov V.A. The basic principles of scale for assessing earthquake intensity in the Baikal seismic zone // Proceedings of the fifth international conference on SEISMIC ZONATION. France, Nice, 1995, P.1106-1114.
5. Поляков С.В., Айзенберг Я.М., Ойзерман В.И. О проекте новой главы СНиП II-7 Строительство в сейсмических районах // Строительная механика и расчёт сооружений, 1979, N 4.
6. Шебалин Н.В. Распределение степеней повреждения зданий и использование его для оценки балльности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М., Наука, 1975, с.253-266.
7. Ципенюк И.Ф. Повреждаемость и надёжность крупнопанельных зданий при сейсмических воздействиях. // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.29, 1988, с.141-153.
8. Рахутина Н.В., Бержинский Ю.А. Опорная сеть зданий-представителей как основа региональной макросейсмической шкалы. // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века. -Новосибирск: Наука, 1996, с.199-203.
9. Антикаев Ф.Ф. Разработка новой шкалы сейсмической интенсивности для республики Казахстан. (Отчёт) Талгар, 1992, с.75.
10. J Murphy, L.O'Brien. The correlation of peak acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. BSSA, 67, N3, 1977, p.877-915.
11. Антикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В. Уточнения корреляций между уровнем макросейсмического поля эффекта и динамическими параметрами движения грунта. // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 23, 1988, с.98-108.
12. Павленов В.А., Потапов В.А., Чечельницкий В.В., Черных Е.Н. Проблемы количественной оценки ощутимых и сильных сейсмических движений в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ). // Монография "Землетрясение в Зун-Мурино 30 июня 1995 года". (в печати).
13. Artikaev F.F. Development of detailed Seismic Zoning. // Journal of Earthquake Prediction Research. Beijing, 1993, v.2, N1.P.115-123.
14. Морозов В.Н. Кинематические параметры грунта и интенсивности землетрясения. // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып.4. М., 1994, с.49-57.
15. Солоненко В.П. Палеосейсмогеология //Изв.АН СССР, серия "Физика Земли", 1973, №9, с.3-16.
16. Новый каталог землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975г. Москва, "Наука", 1977, 536 с.
17. The Map of regional crust stability of China. Scale 1: 5000000. Compiled by Institute of Geomechanics of China Academy of Geological Sciences. Geol. Publishing House, Beijing, China, 1998.
18. Онофраш Н.И., Перельберг А.И., Роман А.А. Применение информационных статистик для составления сейсмической шкалы и оценки сейсмического эффекта. // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М., Наука, 1975, с.149-156.