



В. А. ЛАПИН

кандидат технических наук, директор Центра научных исследований-ученый секретарь АО «КазНИИСА», член-корреспондент НИА РК и МИА

С. Е. ЕРЖАНОВ

кандидат технических наук, советник генерального директора по науке АО «КазНИИСА», член-корреспондент НИА РК и МИА

АО «КазНИИСА», г. Алматы

УДК 550.30:699.841

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАНЦИЙ ИНЖЕНЕРНО- СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ НА ЗДАНИЯХ

Рассмотрены методологические основы применения сети станций инженерно-сейсмометрической службы АО «КазНИИСА». В зависимости от типа решаемых задач все станции разбиты на группы (полигоны). Отдельно собраны здания, находящиеся вблизи тектонических разломов. На одной площадке расположены здания, оснащенные системами сейсмозащиты и дом-аналог. Анализируются средства обработки инструментальных записей – корректировка нулевой линии акселерограммы по виду корреляционной функции, построение распределения ускорений на азимутальной плоскости. Анализируются возможности обработки инструментальных записей за многолетний интервал регистрации. Даются рекомендации по дальнейшему развитию инженерно-сейсмометрической службы АО «КазНИИСА».

Ключевые слова: сейсмостанции, сейсмозащита, акселерограммы.

Существует немного инструментов простых, но очень полезных для изучения зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах. Такими являются станции инженерно-сейсмометрической службы на зданиях. Доставляемая ими инструментальная информация касается как особенностей деформирования зданий при землетрясении, так и закономерностей колебания основания сооружения. Применение такой информации серьезно снижает потери (уменьшает риски) при возможных землетрясениях.

Первая станция инженерно-сейсмометрической службы в Алматы была создана в 1967 году [1]. Первая инструментальная запись получена 22.12.1967 года. Станция была оснащена аналоговыми акселерометрами и сейсмографами. В дальнейшем сеть станций бурно развивалась и к 90-м годам прошлого века насчитывала 24 станции.

Инженерно-сейсмометрическая служба (далее – ИСС) в Республике Казахстан представлена в настоящее время 12 станциями, в том числе в г. Тараз (1 станция) и г. Капшагай (1 станция), расположенными на зданиях различной конструкции. Ниже указаны места расположения станций, типы зданий и аппаратуры, а также грунтовые условия места регистрации (таблица 1). На 4-х станциях установлена как цифровая аппаратура, так и аналоговая.

На станциях преобладают старые аналоговые приборы. Это датчики ВБП, измеряющие скорости и смещения, и датчики ОСП, регистрирующие ускорения и скорости. Имеются также датчики СМ-4, записывающие смещения.

Оснащение зданий станциями ИСС это не самоцель, а способ решения самых насущных задач сейсмостойкого строительства.

Инженерно-сейсмометрической службой (ИСС) решаются следующие **основные** задачи:

1. Получение фактических (**экспериментальных**) инструментальных данных о динамических параметрах и напряженном состоянии несущих конструкций зданий в разных грунтовых условиях;



Таблица 1 — Перечень действующих инженерно-сейсмометрических станций

№№ п./п.	Номер станции и наименование	Адрес и год организации станции	Конструктивная схема здания	Тип станции
1	2	3	4	5
1	Станция 1 «ИНСТИТУТ»	пр. Гагарина угол ул. Джандосова, 1968 г.	4-этажное каркасное здание ТОО «ПРОМСТРОМ-ПРОЕКТ» / валуногалечник / модернизирована в 2007 г. / цифровая регистрация	Аналоговая + цифровая РСМ-8
2	Станция 3 «ШКОЛА»	пр. Райымбека, угол пр. Абылай хана, 1969 г.	4-этажное каркасное / ж/б / галечник с прослойками песков и глины	Аналоговая
3	Станция 7 «ТУЛЕБАЕВА»	ул. Тулебаева, угол ул. Казыбек-би, 1974 г.	9-этажное каркасное / ж/б / СЖКУ-9 / валуногалечник	Аналоговая
4	Станция 11 «пр. АБАЯ»	пр. Абая, угол ул. Фурманова, 1970 г.	11-этажное каркасное / сталь / валуногалечник / Модернизирована в 2010 г. / цифровая регистрация	Аналоговая + цифровая РСМ-8
5	Станция 15 «КАПШАГАЙ»	г. Капшагай, Капшагайская ГЭС, 1975 г.	1-этажное каркасное промышленное здание /стальное /плотины: насыпные высотой 30 м и 40 м./ Трециноватый скальный грунт / восстановлена в 2005 году	Аналоговая
6	Станция 16 «ВЫСОТНАЯ ГОСТИНИЦА»	пр. Достык угол пр. Абая, гостиница «Казахстан», 1977 г.	25-этажная гостиница /пространственная система, образованная из эллипсоидного ствола с расходящимися в вертикальной плоскости диафрагмами / валуногалечник с песчаным заполнением / Модернизирована в 2009 г. / цифровая регистрация	Цифровая РСМ-16
7	Станция 17 «НОВАЯ ПЛОЩАДЬ»	ул. Байсеитова, площадь Республики, 1987 г.	17-этажное жилое здание с ядром жёсткости / плотные валуногалечники / модернизирована в 2008 г. / цифровая регистрация	Аналоговая + цифровая РСМ 8
8	Станция 20 «ДОМ – АНАЛОГ»	ул. Розыбакиева, 25, 1989 г.	9-этажное крупнопанельное здание серии 158 / фундаменты – система перекрёстных лент / валуногалечник	Аналоговая
9	Станция 21 «ДОМ – КФ»	ул. Розыбакиева, 33, 1989 г.	9-этажное крупнопанельное здание серии 158 / фундаменты – кинематические / валуногалечник	Аналоговая
10	Станция 22 «ДОМ – ФТ»	ул. Розыбакиева, 41, 1989 г.	9-этажное крупнопанельное здание серии 158 с сейсмоизоляцией опор прокладками из фторопласта / валуногалечник	Аналоговая
11	Станция 23 «ТАРАЗ – ФИЛИАЛ»	г. Тараз, ул. Сулейманова, 19 ^б , 2004 г.	3-этажное кирпичное здание	Аналоговая
12	Станция 24 «УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР»	ул. Мынбаева, 53, 2008 г.	3-этажное каркасное здание / валуногалечник	Аналоговая

2. Оценка накопления повреждений в несущих конструкциях и уточнение резервов несущей способности зданий после сейсмического воздействия (**землетрясения**).

3. Накопление базы данных инструментальных инженерно-сейсмометрических записей землетрясений, используемых для:

- уточнения карты микросейсмозонирования территории в части влияния грунтовых условий на реакцию здания;
- уточнения расположения тектонических разломов;

- уточнения действовавших сейсмических нагрузок на здания и сооружения при реальных землетрясениях. Например, преобразованные записи станций ИСС использовались при расчете зданий с системами активной сейсмозащиты;
- построения спектральных кривых и региональных акселерограмм с учетом местных особенностей сейсмического воздействия.
Сеть станций (таблица 1) распадается на совокупность полигонов, решающих те или иные задачи – таблица 2.

Таблица 2 — Перечень решаемых задач

№	Решаемая задача	Станции	Примечание
1	Оценка эффективности систем сейсмоизоляции	№20 «ДОМ – АНАЛОГ», №21 «ДОМ – КФ», №22 «ДОМ – ФТ»	
2	Накопление базы данных инструментальных инженерно-сейсмометрических записей землетрясений	Все станции	
3	Оценка влияния тектонического разлома на реакцию зданий	№16 «ВЫСОТНАЯ ГОСТИНИЦА», № 17 «НОВАЯ ПЛОЩАДЬ»	
4	Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическое воздействие и реакцию здания	Все станции	Грунты в основном II типа по сейсмическим свойствам
5	Построение спектральных кривых и региональных акселерограмм с учетом местных особенностей сейсмического воздействия	Все станции	Для городов Алматы, Тараз, Капшагай
6	Оценка влияния срока эксплуатации на изменение динамических характеристик здания	№16 «ВЫСОТНАЯ ГОСТИНИЦА»	Имеются экспериментальные данные по динамическим характеристикам здания на момент завершения его строительства
7	Определение скорости волны по высоте здания	№16 «ВЫСОТНАЯ ГОСТИНИЦА»	Точки регистрации: подвал, 2-ой, 4-ый, 18-ый, 21-ый, 26-ой этажи
8	Идентификация динамических систем, моделирующих здание	№1 «ИНСТИТУТ», №11 «пр. АБАЯ», №16 «ВЫСОТНАЯ ГОСТИНИЦА», № 17 «НОВАЯ ПЛОЩАДЬ»	Предпочтительней использование цифровых приборно-измерительных систем
9	Набор маятниковых систем для определения частотного состава землетрясения	№1 «ИНСТИТУТ», № 11 «пр. АБАЯ»	
10	Оценка влияния гидроудара на сейсмостойкость насыпной плотины	№ 15 «КАПШАГАЙ»	

Пятидесятилетний опыт эксплуатации станций ИСС, обработки инструментальных записей явился причиной разработки различных способов анализа акселерограмм землетрясений.

До сих пор большая часть станций оснащена аналоговой регистрирующей аппаратурой. Инструментальные записи записываются на фотобумагу. На следующем этапе выполняется оцифровка аналоговых записей. Она может быть ручной, машинной, с использованием сканирующих систем или специально разработанных программ. Но на всех будет иметь место определенная погрешность, обусловленная как объективными, так и субъективными причинами.

Поэтому стоит рассмотреть возможный способ корректировки нулевой линии инструментальной записи.

На рис. 1 приведен образец инструментальной записи (акселерограммы) с небольшим малозаметным отклонением от нулевой линии (акселерограмма Баканасского землетрясения 25.09.79, станция «Тулебаева», $M=5,8$, $H=35$ км, $D=158$ км, шаг дискретизации 0,025 сек). Однако корреляционная функция акселерограммы очень сильно отклонена от нулевой линии, что практически исключает ее аппроксимацию и использование (рис. 2).

Автоматическая сдвигка нулевой линии акселерограммы (корректировка) сопровождалась пересчетом корреляцион-

ной функции. На рис.3 изображена корреляционная функция после корректировки нулевой линии. Корреляционная функция практически расположена на оси времени запаздывания, пересекая ее по длине.

При этом максимальное значение ускорения на исходной акселерограмме изменилось весьма мало с $4,4$ см/сек² до $4,0$ см/сек².

Двухкомпонентная инструментальная запись землетрясения в горизонтальной плоскости есть разложение сейсмического воздействия по двум ортогональным осям, ориентированным по частям света или по каким-то иным направлениям (например, по осям здания).

Поэтому параметры воздействия: максимальные или среднеквадратичные ускорения, частотный состав (видимые или преобладающие периоды) изучаются по проекциям сейсмического воздействия на эти оси. Следовательно, полученная таким образом информация о параметрах воздействия носит в известной степени случайный характер, так как поворотом вокруг оси можно получить новую систему координат, в которой проекции вектора ускорения могут иметь другие, весьма различные, параметры. Следовательно, динамический эффект землетрясения также различается в зависимости от ориентации системы координат.

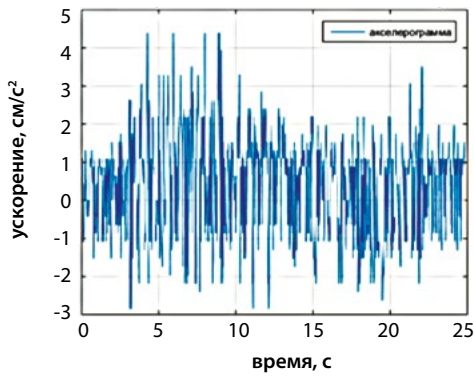


Рисунок 1 — Акселерограмма Баканасского землетрясения 25.09.1978

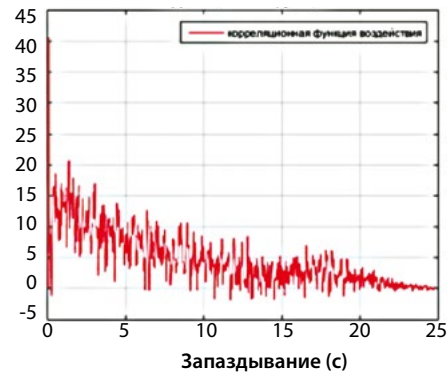


Рисунок 2 — Корреляционная функция Баканасского землетрясения 25.09.1978

Полагая \ddot{X}_1, \ddot{Y}_1 проекции вектора ускорения \ddot{r} в моменте t , определим \ddot{X}_1, \ddot{Y}_1 в новых осях, образованных поворотом системы координат на угол φ :

$$\begin{aligned} \ddot{X}_1 &= \ddot{X} \cos \varphi + \ddot{Y} \sin \varphi \\ \ddot{Y}_1 &= -\ddot{X} \sin \varphi + \ddot{Y} \cos \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

По формулам (1) определяются проекции \ddot{r} в новых осях, то есть инструментальные записи пересчитываются в новых осях. Естественно, что в полученных таким образом акселерограммах меняются их характеристики – период максимума спектра, эффективная длительность и т.д.

Для примера рассмотрим инструментальные записи, записанные на сейсмостанции №17 «Новая площадь», при землетрясении 26.03.2018 на территории Алматы, отнесенному к сейсмическому событию с интенсивностью 4 балла.

На рисунках 4–5 представлены распределения ускорений в горизонтальной плоскости, как в уровне 10-го этажа, так и в уровне кровли. Шаг по углу $2\pi/50$. Угол изменялся от 0 до 2π . Значения ускорения вычислялись в 51 точке. В уровне 10-го этажа максимальное значение ускорения равно $14,26 \text{ см/сек}^2$, кровли – $9,83 \text{ см/сек}^2$. Распределение ускорения в горизонтальной плоскости в уровне технического этажа имеет весьма неравномерный вид (рис. 5) – напоминает «восьмерку». Такое распределение имеет место в случае, когда по одной из ортогональных осей величина ускорения близка к нулю, а по другой имеет едва ли не максимальное значение. Достаточно стандартным является распределение ускорений на рис. 4.

Понятно, что для каждой акселерограммы можно построить спектральные кривые, которые будут характеризовать динамический эффект по указанному направлению [2].

Здесь самое время рассмотреть вопрос о построении спектральных кривых. Самым распространенным способом является использование модели Фойгта, описывающей колебания одномассовой упругой системы с рассеянием энергии на преодоление вязкого трения – как принято было говорить, тело Фойгта с параллельным соединением упругого и вязкого элементов. Такой способ является самым распространенным, и ему посвящена многочисленная библиография.

Следующей моделью является тело Максвелла с последовательным соединением упругого и вязкого элементов.

Дифференциальное уравнение колебания такой системы имеет вид, например, [3]:

$$nm\ddot{\ddot{x}} + m\ddot{\ddot{x}} + nc\dot{x} = P_0 + n\dot{P}_0, \quad (2)$$

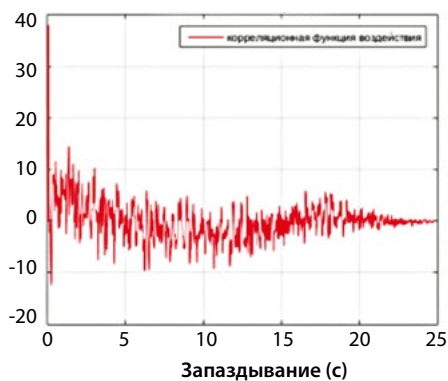


Рисунок 3 — Корреляционная функция Баканасского землетрясения 25.09.1978 после корректировки нулевой линии

где $n = \mu/c$ – время релаксации; c – жесткость; μ – коэффициент внутреннего вязкого трения; m – масса; x – перемещение системы. Для случая кинематического воздействия $P_0 = -m\ddot{x}_0$ (\ddot{x}_0 – акселерограмма).

Удобно выразить коэффициенты уравнения динамики через коэффициент $\alpha = \frac{c}{2\mu}$ и частоту упругой системы

$$\omega^2 = \frac{c}{m} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2;$$

$$\ddot{\ddot{x}} + 2\alpha\ddot{\ddot{x}} + \omega^2\dot{x} = -2\alpha\ddot{x}_0 - \ddot{x}_0. \quad (3)$$

Это уравнение менее удобно для построения спектральной кривой, чем классическое для тела Фойгта. Причина не в том, что в правой части стоит производная от акселерограммы. Уравнение (3) становится много параметрическим – в него независимо входит коэффициент внутреннего вязкого трения μ , упругая жесткость c и период или частота упругой системы.

Уравнение (3) проинтегрировать численно достаточно несложно. Производная от акселерограммы $\ddot{\ddot{x}}_0$ определяется достаточно просто с помощью быстрого преобразования Фурье.

Известно, что по данным экспериментальных исследований расход энергии на одно колебание мало зависит от частоты. Однако для модели Фойгта эта энергия прямо пропорциональна частоте возмущающей силы, что совсем не соответствует экспериментальным данным [4].

Для тела Максвелла зависимость энергии, расходуемой на одно колебание системы, от частоты возмущающей силы

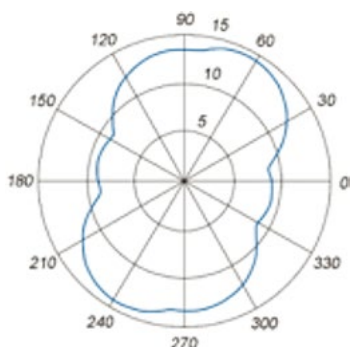


Рисунок 4 — Распределение ускорений на азимутальной плоскости в уровне 10-го этажа

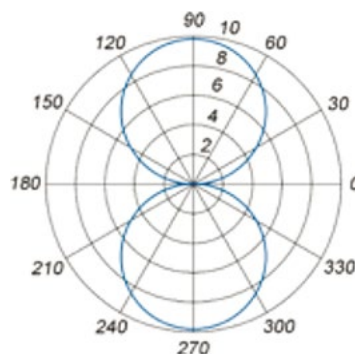


Рисунок 5 — Распределение ускорений на азимутальной плоскости в уровне технического этажа

носит весьма сложный характер, что ближе соответствует результатам эксперимента. Поэтому результаты, получаемые на основе модели Максвелла, являются на первый взгляд более достоверными. Безусловно, этот результат в полной мере имеет место для случая моногармонического воздействия.

Поэтому для анализа инструментальных записей станций инженерно-сейсмометрической службы наиболее удобным является использование классической модели Фойгта, в явном виде зависящей от двух параметров – декремента колебания δ и периода колебаний упругой системы T :

$$\ddot{x} + 2\frac{\delta}{T}\dot{x} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x = -\ddot{x}_0. \quad (4)$$

Принцип непрерывности наблюдения – основополагающий при проведении инженерно-сейсмометрических наблюдений. Даже старые аналоговые приборы доставляют инструментальные записи землетрясений. Оцифровка таких записей является достаточно сложной. Однако это не является причиной для избавления от устаревших аналоговых акселерометров.

На рис. 6 представлены спектральные кривые акселерограмм, полученных при землетрясениях 23.03.1978 г. и 26.03.2018 г. на станции «Капшагайская ГЭС» [5].

Интервал времени между указанными землетрясениями составляет 40 лет.

Анализ показывает, что ввиду отличий параметров очагов землетрясений, спектральные кривые не совпадают абсолютно. Однако в высокочастотной области максимальные величины спектрального коэффициента отличаются не более чем на 10%, а периоды максимума спектра – на 20%, что является характеристикой спектрального состава в данной точке регистрации.

Указанные выше принципы создания и обработки инструментальных записей землетрясений будут использованы при создании сети станций в городах Усть-Каменогорск, Шымкент, Талдыкорган, Туркестан и т. д.

Первые два города являются крупными промышленными центрами Республики Казахстан, где вместе с достаточно большим жилым фондом имеется много предприятий тяжелой промышленности. Сейсмостанции планируется установить на зданиях вблизи тектонических разломов, на площадках с неблагоприятными грунтовыми условиями.

Кроме того, Шымкент это второй город в Казахстане с населением более миллиона человек. Поэтому создание про-

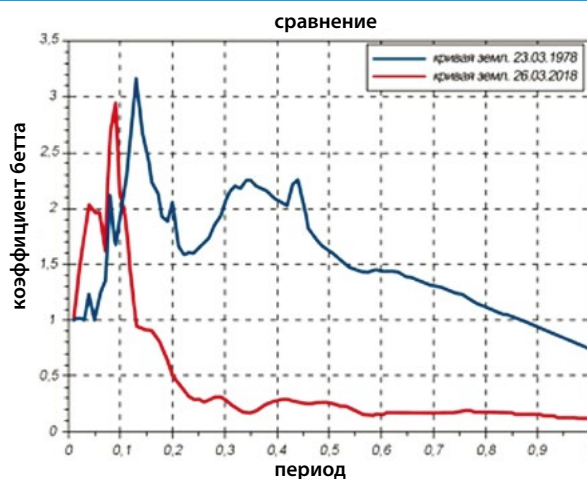


Рисунок 6 — Сравнение спектральных кривых двух землетрясений 23.03.1978 г. и 26.03.2018 г.

думанной сети станций ИСС является важной и актуальной задачей.

ВЫВОДЫ

1. Сеть станций инженерно-сейсмометрической службы на зданиях АО «КазНИИСА» является эффективным поставщиком информации о поведении зданий и сооружений в условиях реального сейсмического воздействия.
2. Способ корректировки нулевой линии акселерограммы по ее корреляционной функции может оказаться полезным при массовой обработке инструментальных записей, полученных станциями ИСС.
3. Инструментальная информация используется как при корректировке нормативно-технических документов в строительстве, так и при проведении прямых динамических расчетов зданий и сооружений.
4. Станции ИСС незаменимы при изучении поведения зданий вблизи тектонических разломов. На территории города Алматы две станции установлены на зданиях, расположенных вблизи тектонических разломов. Расстояние до предполагаемого края разлома измеряется десятками метров. Эти станции являются уникальными постоянными поставщиками инструментальной информации о влиянии разломов на поведение зданий и их оснований при землетрясениях.
5. Указанные выше положения и принципы могут быть использованы при создании сети станций в крупных городах Республики Казахстан.

6. В последние годы выявлена возможность землетрясений с очагами на территории г. Алматы [6]. Поэтому при размещении новых станций на территории города необходимо учитывать и данный фактор.

Исследования выполнялись с использованием средств гранта AP 05130702 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

1. Жунусов Т.Ж., Выпряхкин Ю.А., Парамзин А.М. Постоянно действующая сейсмическая станция на многоэтажном здании в г. Алматы. Исследование сейсмостойкости сооружений и конструкций. Алма-Ата, 1968, вып.2. С.5-8.

2. Лапин В.А., Ержанова Ф.А. Способ учета двухкомпонентного характера сейсмического воздействия. В сб.: Исследования сейсмостойкости сооружений и конструкций. Алматы: 1995, вып. 18 (28). С. 73-80.

3. Лапин В.А., Ержанова Ф.А. Влияние не-фойгтова вязкого трения на динамический эффект при землетрясениях. В сб.: Исследования сейсмостойкости сооружений и конструкций. Алматы: 1997, вып. 19 (29). С. 68-75.

4. Цейтлин А.И., Кусаинов А.А. Методы учета внутреннего трения в динамических расчетах конструкций. Алматы: Наука, 1986. 238 с.

5. Лапин В.А., Ержанов С.Е., Даугавет В.П. Анализ акселерограмм, записанных вблизи Капшагайской ГЭС. Вестник международ-

ной ассоциации по сейсмостойкому строительству (Труды конференции) Бишкек. 2018(2). № 1. С.87-91.

6. Лапин В.А., Ержанов С.Е., Даугавет В.П., Девятых А.А. Исследование инструментальных записей местного землетрясения 02.02.2018 в г. Алматы. «Вестник АО «КазНИИСА». Алматы, 2018. №2(73).С.15-21.

Материалы хранятся по адресу:
050046, Республика Казахстан, г.Алматы,
ул.Солодовникова, 21 (АО «КазНИИСА»)
Тел.8 (727) 3926896,
e-mail: lapin_1956@list.ru

LAPIN V.A., Ph.D. in Engineering Science, Director of Center for Scientific Research, Academic Secretary of KazNIISA JSC, Corresponding Member of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan and International Engineering Academy (Almaty, Kazakhstan)

YERZHANOV S.Y., Ph.D. in Engineering Science, Adviser to Director General for Science of KazNIISA JSC, Corresponding Member of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan and International Engineering Academy (Almaty, Kazakhstan)

METHODOLOGICAL FUNDAMENTALS FOR USING STATIONS OF ENGINEERING SEISMOMETRIC SERVICE ON BUILDINGS

Abstract

Methodological fundamentals for application of the network of stations of Engineering Seis-mometric Service of KazNIISA JSC are described. Based on the type of problems being solved, all stations are divided into groups (polygons). Buildings located in close proximity to tectonic faults are gathered separately. Buildings equipped with seismic protection and analog house systems are situated at one site. Instrumental records

processing means are analyzed – adjustment of zero base-line of the accelerogram according to the type of correlation function, building of accelerations distribution on azimuthal plane. Capabilities to process instrumental records over a long recording interval are analyzed. Recommendations are given for further development of Engineering Seismometric Service of KazNIISA JSC.

Keywords: seismic stations, seismic protection, accelerograms.

References

1. Zhunusov T.Zh., Vypryahkin Yu.A., Paramzin A.M. Permanent Seismic Station on Multistory Building in the city of Almaty. Earthquake Resistance Research of Buildings and Structures. Alma-Ata, 1968, Ed. 2, pp. 5-8.

2. Lapin V.A., Yerzhanova F.A. Method of Taking Account of Two-Component Nature of Seismic Effect. In collected book: Earthquake Resistance Research of Buildings and Structures. Al-

maty: 1995, Ed. 18 (28), pp. 73-80.

3. Lapin V.A., Yerzhanova F.A. Influence of Non-Voigt Viscous Friction on the Dynamic Effect during Earthquakes. In collected book: Earthquake Resistance Research of Buildings and Structures. Almaty: 1997, Ed. 19 (29), pp. 68-75.

4. Tseitlin A.I., Kusainov A.A. Methods of Taking into Account Internal Frictions in Dynamic Analysis of Structures. Almaty: Nauka, 1986. 238 p.

5. Lapin V.A., Yerzhanov S.Y., Daugavet V.P.

Analysis of Accelerograms Recorded near Kapshagay HPP. Bulletin of the International Association for Earthquake Engineering (Proceedings of the Conference), Bishkek, No. 1, 2018(2), pp. 87-91.

6. Lapin V.A., Yerzhanov S.Y., Daugavet V.P., Devyatikh A.A. Study of Instrumental Records of Local Earthquake on 02.02.2018 in the city of Almaty. Bulletin of KazNIISA JSC. Almaty, 2018. No.2 (73). Pp. 15-21.

Для цитирования: Лапин В.А., Ержанов С.Е. Методологические основы использования станций инженерно-сейсмметрической службы на зданиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 4. С. 44-49.

For citation: Lapin V.A., Yerzhanov S.Y. Methodological fundamentals for using stations of engineering seismometric service on buildings // *Seismostoi koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 4, pp. 44-49. (In Russian).