



КИОДЖИ СЮЭХИРО, профессор.

«Инженерная сейсмология»

Издательство «Экономическая жизнь»

1935 г.

#### ОТ РЕДАКЦИИ

*В 1935 году в издательстве «Экономическая жизнь» вышла в свет книга японского ученого, профессора Киоджи Сюэхиро «Инженерная сейсмология». В предисловии к русскому переводу профессор В.О. Цшохер и инженер В.А. Быховский писали: «Появление книги в русском переводе должно рассматриваться как явление чрезвычайной важности в области изучения сейсмических сил и можно только пожалеть, что она не выпущена раньше».*

*Сегодня эта замечательная книга стала библиографической редкостью. В стремлении исправить это положение редакция журнала приняла решение опубликовать на страницах журнала три лекции (три части книги), и переиздать этот выдающийся труд отдельным изданием.*

## ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ. ЛЕКЦИЯ 2

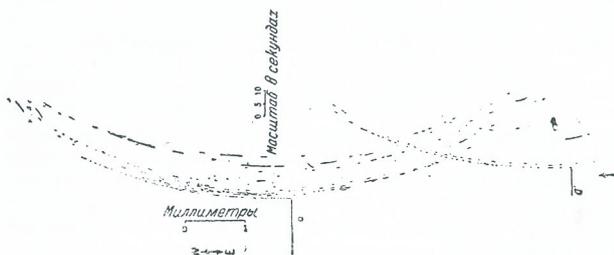
### СОДЕРЖАНИЕ

Отличительные признаки основных данных, требуемых инженерами и геофизиками, изложены в этой лекции. Обычные типы сейсмографов совершенно непригодны для записи колебаний сильных землетрясений непосредственно в эпицентральной зоне, ибо они должны быть также достаточно чувствительными для записи отдаленных колебаний. В этой лекции поставлена проблема сейсмографа и экселерографа для измерения «мощных движений», что обеспечит инженерам наилучшие возможности в получении ценных данных.

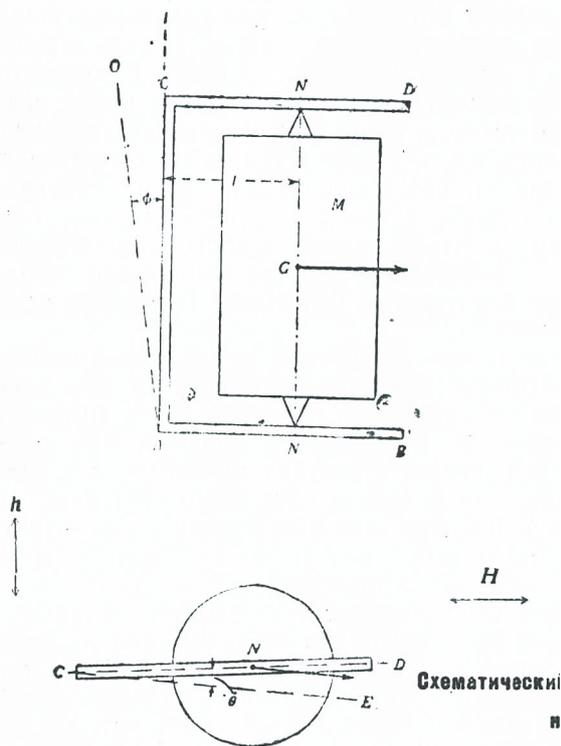
На основе наблюдений и изучения землетрясения 1923 г. в Токио доктор Сюэхиро пришел к заключению, что в настоящее время при постройке сооружений следует руководствоваться величиной ускорения  $0,15 g$ , несмотря на то, что имелось обилие фактов, указывающих на еще большие уско-

рения, встречавшиеся в эпицентральной зоне. Однако, так как даже в сейсмических странах любое сооружение подвергается вероятно разрушительным землетрясениям только раз или два раза за время своего существования, вопросы экономии приобретают большое значение. Несмотря на то, что землетрясение 1923 г. было наиболее сильным из всех отмеченных историей землетрясений, сооружения, спроектированные при учете сейсмического коэффициента  $0,1 g$  оказались вполне сейсмостойкими.

Лекция содержит сравнительные иллюстрации одно-временных записей вибрографов в зданиях и в прилегающем грунте. Анализатор сейсмических колебаний, работающий по принципу селекции резонанса, как в измерителе частоты Hartmann'a, изобретен доктором Сюэхиро. Записи, получаемые его прибором, обнаруживают преобладающие периоды колебаний, свойственные исследуемой местности.



**Рисунок 20** — Частичная запись землетрясения в Иду, полученная в районе эпицентра



**Рисунок 21** — Схематический чертеж горизонтального маятника Ивинга

При проектировании сооружений весьма важно учесть отношение между периодом колебаний, свойственным сооружению и грунту, воздействие грунта на затухание колебаний и взаимодействие между грунтом и фундаментом сооружения. Эти проблемы фактически не поддаются математическому расчету, но одним из осуществимых решений являются опыты с моделями, спроектированными при условии удовлетворения законов динамического подобия. Отмечаются опыты с моделями деревянных зданий.

### Введение

Точные сейсмометрические данные одинаково важны и геофизику и инженеру-строителю: однако требования последних к ним неодинаковы. Первый, особенно если он европеец, стремится наблюдать различные фазы и формы волн землетрясения с целью определения границ расположения его источника, скорости распространения сейсмических волн и изучения характера различных напластований, образующих земную кору и т. д. Для инженера-строителя в

сейсмических странах большинство подобных данных не имеет большого значения, хотя косвенно и они могут его интересовать. Продолжительность предварительных колебаний перед землетрясением, например, весьма интересует геофизиков, однако инженеры-строители обыкновенно равнодушны к этому вопросу. Инженеру крайне необходимы сведения об интенсивности и характере основных движений при разрушительных землетрясениях.

Работа по сейсмометрическому наблюдению обыкновенно находится в руках геофизика, который естественно пользуется сейсмографом, соответствующим интересующим его объектам наблюдений, а именно—приборами, обладающими высокой чувствительностью и незначительной устойчивостью. Совершенно естественно поэтому, что всякий раз, когда происходит сильное землетрясение, записывающее перо всех сейсмографов, установленных в интенсивных сейсмических районах, как только начинаются главные колебания землетрясения, выходит за пределы записывающего барабана. Таким образом в лучшем случае получается запись только предварительного колебания. Колебания записывающего пера вне барабана обыкновенно принимаются как признак сильного землетрясения. По этим причинам до сих пор мы не имеем ни одной полной и заслуживающей доверия диаграммы разрушительного землетрясения, полученной при помощи сейсмографа, установленного вблизи эпицентра, не говоря в настоящее время об экселерографах, которые для инженеров имеют гораздо большее значение, нежели сейсмографы.

Под «сейсмографами» я подразумеваю такие приборы, у которых период собственных колебаний длиннее, чем периоды любых сейсмических движений и которые предназначены для записи только периодов самих сейсмических движений. Под «экселерографами» я подразумеваю такие приборы, у которых период собственных колебаний короче периода любых сейсмических движений и которые предназначены для непосредственной записи ускорений, производимых этими движениями.

Таким образом величины ускорений, приписываемые минувшим сильным землетрясениям, простые догадки; об их величине обычно судили на основании опрокинутых и смещенных надгробных памятников и других подобных явлений. Ясно, что такие методы слишком грубы и иногда даже вводят в заблуждение: во-первых, трение твердых тел, подверженных сложным вибрациям, не может быть определено; и, во-вторых, как правило, в самом начале разрушительного землетрясения при близком и неглубоком расположении гипоцентров движение начинается внезапно. Рис. 20 изображает частичную запись недавнего землетрясения в Иду, на которое я уже ссылался, полученную в эпицентральной зоне. Хотя явно отрывистое движение в самом начале землетрясения частично может быть вызвано внезапным освобождением регистрирующего механизма сейсмографа от начального трения или игрой (капризами) механизма, однако едва ли можно сомневаться в большей или меньшей отрывистости в начале сейсмического движения.

Импульсивное движение в начале сильного землетрясения эпицентральной области весьма ясно проявилось во время землетрясения в Таджики (Таджима) в 1925 г. Во время этого землетрясения в одной сельской начальной школе в районе

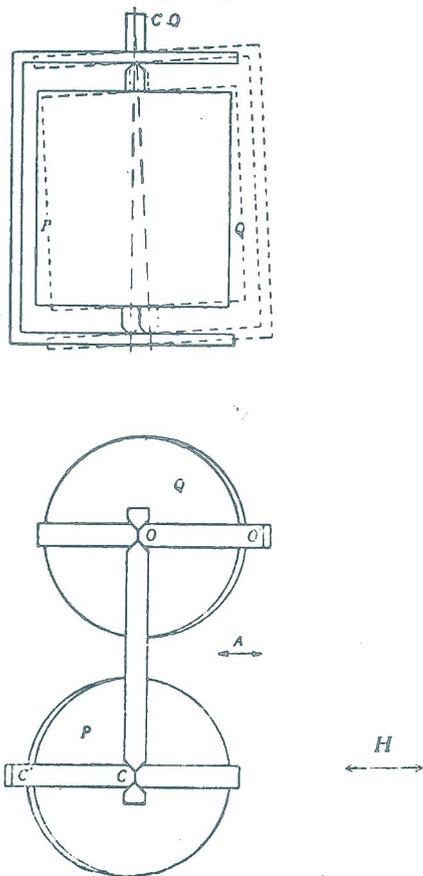


Рисунок 22 — Схема спаренных маятников Ивинга

эпицентра сбережения школьников в виде медных монет хранились в пустой жестяной коробке с крышкой. Школьный учитель заметил, что в тот момент, когда началось землетрясение, монеты отшвырнули крышку и выскочили из жестяной коробки, которая осталась на своем месте. Это явление указывает, что в начале движения вертикальное ускорение было больше чем  $g$ , т. е. больше ускорения силы тяжести. Тем не менее здание школы (двухэтажный деревянный дом) сравнительно хорошо выдержало землетрясение, хотя оно и потерпело некоторые более или менее сильные повреждения.

Движение импульсивного характера, вроде удара молота, может вызвать смещение или опрокидывание мелких твердых предметов, но очевидно оно не может быть причиной разрушения сооружений, обладающих большей или меньшей упругостью. В некоторых случаях интенсивность сильного землетрясения, определенная указанным способом, может быть как раз и представлена таким начальным ускорением, однако оно не представляет собой ту данность, в которой так срочно нуждаются инженеры-сейсмологи.

Поэтому данные об интенсивности землетрясения должны быть получены научным путем на основании заслуживающих доверия записей, сделанных соответствующими приборами. Некоторые записи были получены при помощи сейсмографа в 1923 г. при землетрясении в Куанто, которое было уже подробно мною описано; если эти записи заслуживают доверия, они дадут ценные сведения, оставляя в стороне основной вопрос о ценности сейсмограмм, о чем будет речь в дальнейшем.

## I. Сейсмографы для «сильных колебаний»

Прежде чем приступить к исследованию этих записей, рассмотрим кратко, какие требования необходимо предъявить сейсмографу для измерения сильных колебаний, с тем чтобы выяснить, с одной стороны, правильно ли были сконструированы и поэтому являются ли пригодными те приборы, которые регистрировали сильное землетрясение, а, с другой стороны, какова должна быть будущая конструкция такого инструмента.

### 1) Тип.

Сначала рассмотрим тип приборов. Среди горизонтальных сейсмографов введенный проф. Ивингом тип с горизонтальным маятником имеет наибольшее применение. В обычном употреблении едва ли можно сомневаться в преимуществах типа сейсмографа, введенного проф. Ивингом, но для измерения землетрясений необычной силы остается желать много лучшего.

Теперь выясним, годен ли прибор, сконструированный по такому принципу, для измерения сильных землетрясений или нет.

Как я уже писал в другом месте, горизонтальный маятник перестает быть верным регистратором, если он подвержен большому ускорению в горизонтальном направлении перпендикулярно движению, которое прибор должен регистрировать.

Изобразим свободное колебание горизонтального маятника Ивинга (Ewing) (рис. 21) следующей формулой:

$$I(\text{ай}) \frac{d^2\theta}{dt^2} + Mg\phi l(\text{эл}) \theta = 0, \quad (1)$$

где  $I(\text{ай})$  – момент инерции маятника (включая все его части) относительно оси вращения  $AC$ ;

$M$  – масса маятника;

$l$  – расстояние до центра тяжести от оси вращения;

$\phi$  – наклон оси вращения к вертикали;

$\theta$  – угол качания плоскости  $CD$ , проходящей через центр относительно положения равновесия  $CE$ .

Когда прибор подвержен гармоническому колебанию (при максимуме ускорения  $a$  и угловой частоте  $p$ ) в продольном направлении ( $H$ ) горизонтально, то, как установлено, движение маятника может быть выражено уравнением:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \{p_0 + p_1(l(\text{эл})^{2i\tau} + l(\text{эл})^{-2i\tau})\} \cdot \theta = 0, \quad (2)$$

где

$$\tau = \frac{p}{2} \cdot t; \quad p_0 = \frac{Mg\phi l(\text{эл})}{I(\text{ай}) \left(\frac{p}{2}\right)^2};$$

$$p_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{M\alpha(\text{альфа}) l(\text{эл})}{I(\text{ай}) \left(\frac{p}{2}\right)^2}; \quad i = \sqrt{-1}$$

Уравнение (2) является особой формой уравнения Хилля, названного по имени известного американского астронома G. W. Hill'a. Это сравнение весьма важно в астрономии, где важнейшие исследования сделаны с его помощью. Оно введено во многие учебники, трактующие о дифференциальных уравнениях высших степеней. Поэтому нет необходимости излагать его здесь. Следует однако отметить, что из дифе-

рениального уравнения (2) можно сделать такой вывод, что когда продольное ускорение велико, горизонтальный маятник теряет устойчивость, и это становится особенно очевидным, когда частота продольного движения составляет половину собственной частоты прибора. Запись при таких обстоятельствах очевидно неверна.

Такое поведение горизонтального маятника Ивинга не требовало бы специального рассмотрения в случае обычного сейсмографа для измерения отдаленных землетрясений, но при конструировании сейсмографа для измерения сильных колебаний оно весьма важно.

Для устранения этой нежелательной особенности горизонтального маятника Ивинга проще всего увеличить период его собственного колебания, сохранив соответственно его устойчивость. Наиболее простой способ одновременно удовлетворить этим двум противоположным требованиям, это – увеличение размеров прибора. Другой, менее простой, но практичный метод, предложен мною. Он состоит в том, чтобы устроить рядом спаренные горизонтальные маятники Ивинга одинаковой конструкции в противоположных направлениях и параллельно друг к другу, с тем чтобы рамы из брусков, поддерживающие маятники, были связаны парной связью над основными осями прибора (рис. 22). Когда такая система подвергается возрастающему колебанию в продольном направлении, ясно, что случайная неустойчивость одного из маятников компенсируется увеличенной устойчивостью другого и этим самым устраняется нежелательное движение прибора.

2) Длина рычага.

Для обычных сейсмографов длина плеча не существенна, но в случае сейсмографа для измерения сильных колебаний этим обстоятельством нельзя пренебрегать. Надо заметить, что когда сейсмограф с коротким плечом подвержен вибрации с большой амплитудой, его поведение не подчиняется уже более теории вынужденного гармонического колебания, так как тогда оно относится уже к категории вынужденного псевдогармонического колебания. Не прибегая к математике можно убедиться в том, что, если амплитуда землетрясения соизмерима с длиной плеча, нечувствительность маятника по отношению к внешнему движению едва ли могла бы иметь место.

По этой причине плечо должно быть достаточно длинным; но следует иметь в виду, что чем длиннее плечо, тем больше чувствительность прибора к раскачиванию почвы, так что слишком большая длина нежелательна; 1 метр или около того оказываются подходящей длиной рычага.

Кроме этих основных условий имеется несколько второстепенных, но не менее важных условий, которые следует соблюдать при конструировании сейсмографа для измерения сильных колебаний.

1. Прибор должен быть приспособлен для записи максимальной амплитуды вибрации грунта, равной по крайней мере 30 см.
2. Все части прибора должны быть достаточно прочными и твердыми.
3. Запись движения не должна быть увеличена, а наоборот, должна быть уменьшена примерно на половину.
4. Маятник должен быть достаточно тяжел, так чтобы препятствовать затормаживанию вследствие трения записывающего пера и других частей.

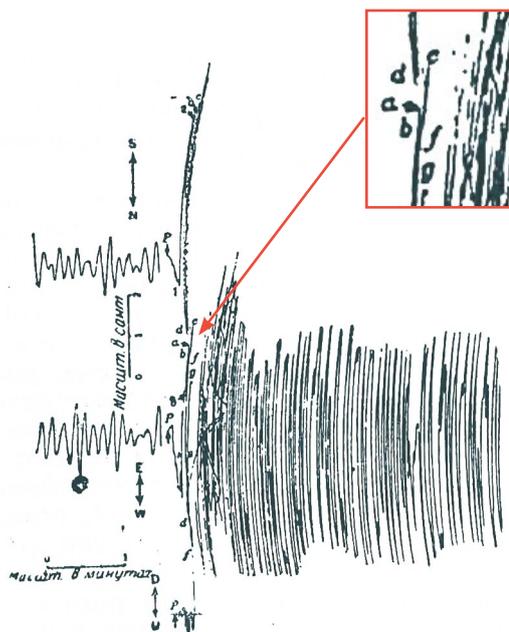


Рисунок 23 — Сейсмограмма землетрясения 1923 г., полученная горизонтальным маятником Ивинга

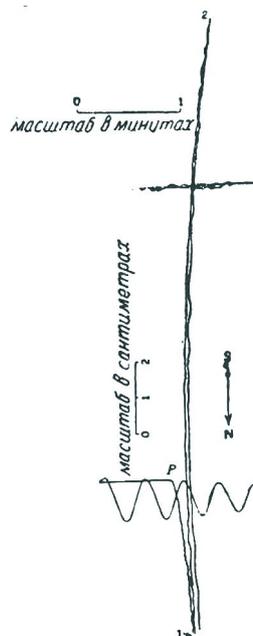
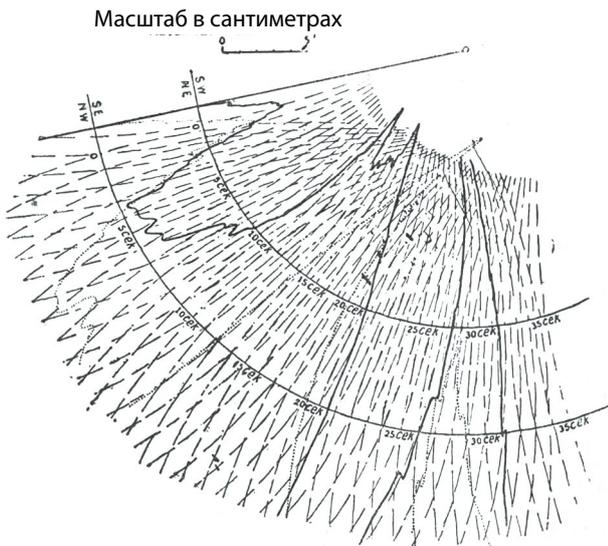


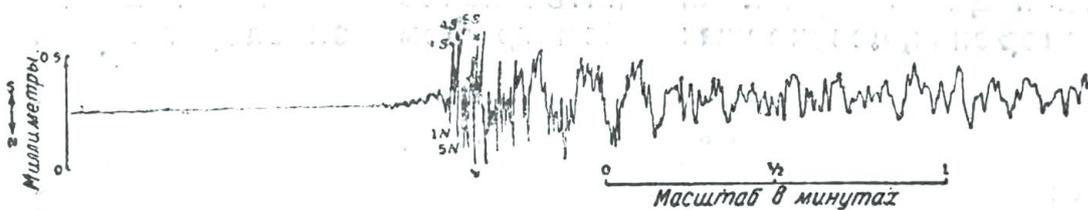
Рисунок 24 — Сейсмограмма землетрясения 1923 г., полученная старинным горизонтальным маятником Омори

5. Период собственных колебаний маятника должен быть достаточно длинным; однако, если это достижимо только за счет значительной потери устойчивости, то период собственных колебаний маятника до некоторой степени должен быть принесен в жертву устойчивости.
6. Особое внимание надо обратить на конструкцию оси подвешивания; она должна быть такой, чтобы соединение не нарушалось при мощном толчке. Рекомендуется применение шарикоподшипников, погруженных в смазочное масло.
7. Регистрирующий барабан должен быть достаточно широк по обоим концам, чтобы обеспечить полную запись землетрясения даже тогда, когда оно случится в начале или в конце записи.

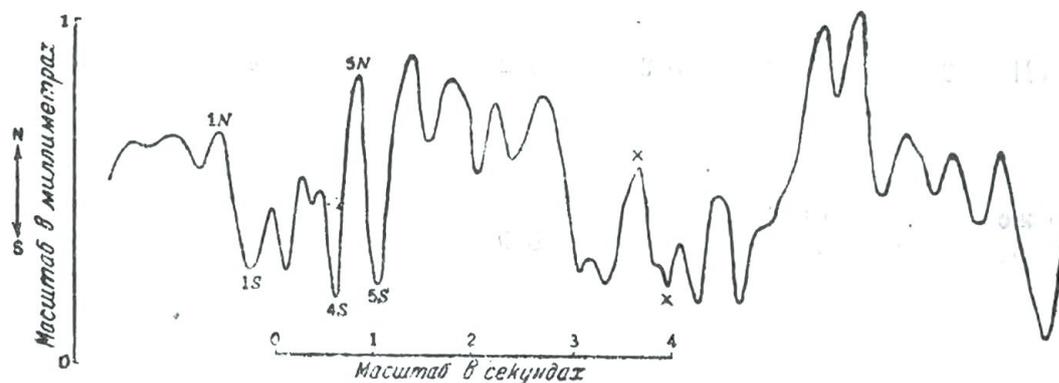


**Рисунок 25** — Сейсмограмма землетрясения 1923 г., полученная старинным сейсмографом Ивинга

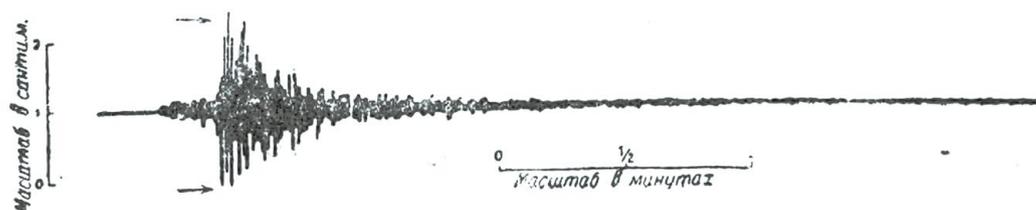
8. Чувствительный глушитель часто бывает причиной затруднений.
9. Применение часового механизма для вращения регистрирующего барабана не рекомендуется, однако если его употребление неизбежно (например, для сейсмографов, применяемых в сельских районах), скорость вращения должна регулироваться тормозом, действующим токами Фуко, или другим подходящим регулятором, но не воздушным тормозом.
10. Для получения диаграммы с расширенной шкалой времени (в отличие от сжатой шкалы) угловая скорость регистрирующего барабана должна быть максимальной (по крайней мере 12 см в минуту); хотя бы только для этой цели рекомендуется применение электрического мотора с равномерным движением для вращения барабана. Излишне говорить, что в этом случае электрический ток не следует брать из городской сети.
11. Пусковое устройство для регистрирующего барабана не удобно для вычисления периода колебания в силу возрастания скорости барабана при пуске. В случае же его применения регистрирующее перо или луч света (но не барабан)



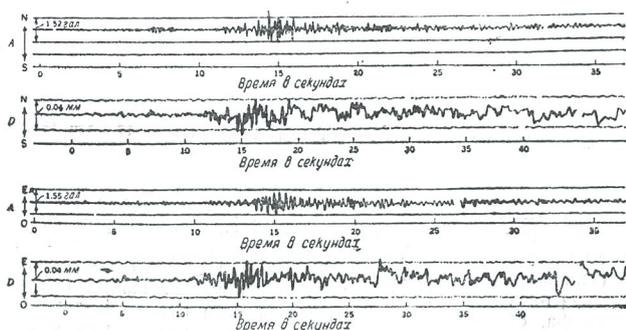
**Рисунок 26** — Сейсмограмма, записанная обычным сейсмографом



**Рисунок 27** — Сейсмограмма, записанная обычным сейсмографом с быстро вращающимся регистрирующим барабаном



**Рисунок 28** — Экселерограмма, записанная оптическим экселерографом Ишимото



**Рисунок 29** — Сравнение сейсмограммы и экселерограммы, полученной механическим экселерографом Ишимото

должны регулироваться пусковым механизмом. Я имел два неудачных опыта из-за пусковой системы. Однажды ночью легкий предварительный толчок, предшествовавший главному колебанию, спустил регистрирующую установку (описываемую ниже в лекции III), прежде чем она могла записать главный толчок. В другой раз ночью отдаленное землетрясение явилось причиной такого же преждевременного пуска, так что запись главного колебания не была получена.

12. Время должно отмечаться независимо от регистрирующего пера. Одновременное использование регистрирующего пера также для отсчета времени нежелательно.
13. Плита основания прибора должна быть прочно прикреплена к основанию болтами или другим способом.
14. Прибор должен быть хорошо защищен от повреждения его падающими обломками.

Выше мною просто перечислены необходимые предосторожности и предложения, насколько это позволило мое знание, полученное из опыта. Поэтому я опасаясь, что другие не менее важные мероприятия не упомянуты.

**II. Интенсивность разрушительного землетрясения 1923 г.**

После того как мы описали, какие необходимые требования предъявляются к сейсмографу для измерения сильных дви-

жений, возвратимся к вопросу об интенсивности землетрясения 1923 г.

Правда, некоторые записи этого землетрясения, как об этом упомянуто выше, были произведены, но все они были неудачны, будучи или неполными или ненадежными. В то время, к сожалению, мы кроме того не имели ни сейсмографов, удовлетворяющих уже перечисленным необходимым условиям, ни экселерографов. Тем не менее для сравнения я продемонстрирую несколько диаграмм, полученных сейсмографами. Одна из них дана (рис. 23) сравнительно непрерывной записью, которая оказалась тем не менее дефектной.

Рассматриваемая запись получена сейсмографом, особенности которого нижеследующие:

1. Тип – горизонтальный маятник Ивинга.
2. Длина плеча – 20 см.
3. Вес маятника – 2,1 кг.
4. Период собственных колебаний маятника – 10 сек.
5. Барабан приводится в движение часовым механизмом, регулируемым стерженьком.
6. Глушитель-флюгер, погруженный в масляную ванну.
7. Степень увеличения – в два раза.
8. Скорость барабана – 4 см в минуту.

Из сказанного мною ранее следует, что во многих отношениях этот прибор не был годен для регистрации сильных землетрясений и особенно такого землетрясения, какое было в 1923 г., когда главные колебания обладали громадными амплитудами и длинными периодами.

Тем не менее проф. Имамура, после тщательного исследования этих записей, пришел к заключению, что в начале основных колебаний (отмечено fg на рис. 23) полная амплитуда была около 9 см, а период – около 1,3 сек., откуда исчисленное ускорение оказывается равным примерно одной десятой (0.1) ускорения силы тяжести. К сожалению, однако острие пера североюжного (№ 5) компонента не только соскочило после нескольких раскачиваний основного сотрясения, но и запись другого компонента указывает, что

**Таблица 1** — Наблюдения Ф. Омори над полуразрушительными землетрясениями в Токио 8.12.21 г. и 14.01.23 г.

Наименование места	Вост. запад компонент				Северо-южный компонент			
	двойная амплитуда (в см)	период (в сек)	ускорение (в см/сек <sup>2</sup> )	отношение ускорения	двойная амплитуда (в см)	период (в сек.)	ускорение (в см/сек <sup>2</sup> )	отношение ускорения
Землетрясение 8 декабря 1921 г.								
Хонго (верхняя часть города)	5,0	3,6	8	1	3,0	1,7	20	1
Хитотсубаши (нижняя часть города)	6,6	3,2	13	1,6	3,5	1,6	27	1,4
Землетрясение 14 января 1923 г.								
Хонго	1,3	1,4	13	1	1,4	1,3	16	1
Хитотсубаши	1,8	1,3	21	1,6	1,4	0,9	34	2,4

сейсмическое движение превзошло максимальный предел амплитуды доступной для записи. Ценность записи все же несомненна, хотя она и не в состоянии дать нам сведений, столь необходимых для инженерного дела, не говоря уже об основном вопросе – о самих сейсмограммах, как таковых.

Эта запись неоценима для геофизиков, так как предварительная часть полностью записана. Действительно, на основе этой записи в течение получаса после возникновения землетрясения проф. Имамура уверенно определил расположение его источника и объяснил природу землетрясения для всеобщего сведения.

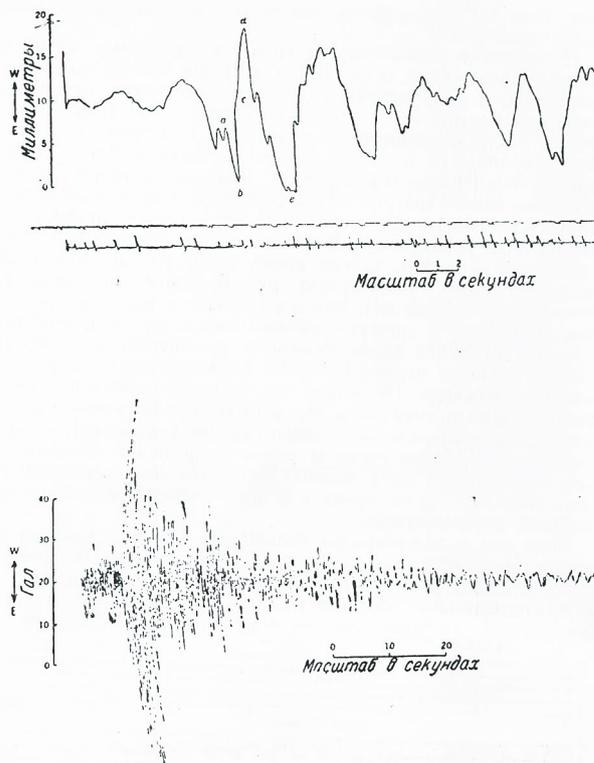
Обратимся теперь к другой записи, полученной сейсмографом, более подходящим для регистрации сильного землетрясения (рис. 24).

Прибор имел следующие показатели:

1. Тип – горизонтальный маятник Омори.
2. Длина рычага – 1 м.
3. Вес маятника – 15 кг.
4. Период собственных колебаний маятника – 40 сек.
5. Барабан приводится в движение часовым механизмом, регулируемым воздушным тормозом.
- 5а. Глушитель отсутствовал.
6. Увеличение – в 1,5 раза.
7. Скорость барабана – 4 см в минуту.

Этот прибор по всей видимости более подходил для регистрации сильного толчка, чем описанный выше. В самом деле, удачные записи многих других сильных землетрясений в прошлом доказали его пригодность; к сожалению, однако перо соскочило с барабана в начале основного движения. Следует однако особо отметить, что согласно записи уже при первом колебании землетрясения амплитуда одного компонента движения составляла около 17 см (возможно раскачивание почвы могло в некоторой мере повлиять на запись; однако, так как период прибора был весьма большой, влияние раскачивания на запись сравнительно быстрых вибраций земли было вероятно незначительно). Ускорение этого движения, согласно вычислению, не было большим, составляя около 15 гал. ( $15 \text{ см/сек}^2$ ), период определяется в 4,9 сек., в предположении, что движение было простым гармоническим (это допущение является еще вопросом, хотя оно общепринято). Поскольку еще мне не изменяет память, последующие волны имели вероятно еще большие амплитуды. На первый взгляд можно усомниться в вероятности появления такого сильного движения, однако другая запись (рис. 25), полученная старинным и менее надежным сейсмографом Ивинга с дисковым регистратором, в действительности подтвердила эту большую амплитуду. Кроме того тот факт, что полная амплитуда (как это зарегистрировано в Токио) землетрясения в Иду в 1930 г. составляла 15 см, подтверждает вывод, что появление такой большой амплитуды, как вышеупомянутая, не невозможно.

Что касается записи сейсмографом Ивинга, она практически непрерывна от начала и до конца, исключая промежутки, когда перо соскакивало с регистрирующего диска и этим прерывалась запись. Хотя прибор с самого начала предназначался для применения в качестве сейсмографа для измерений сильных сейсмических движений, он имел несколько недостатков. Наиболее серьезным недостатком являлось отсутствие устройства для записи времени, поми-

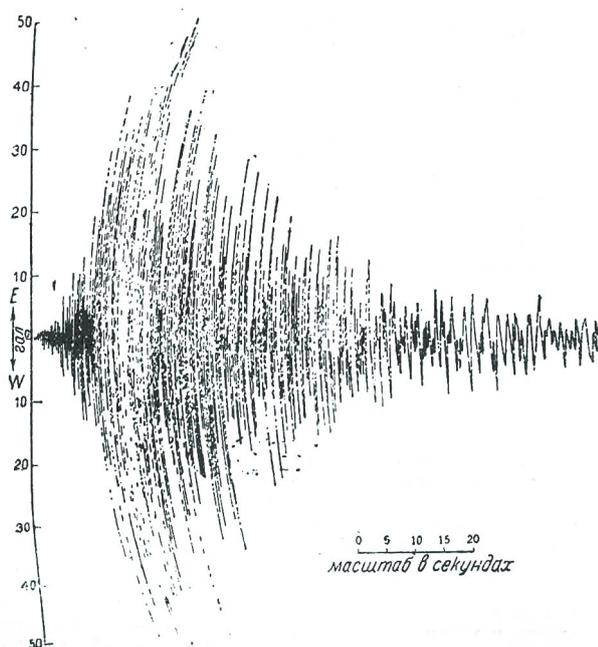


**Рисунок 30** — Сейсмограмма и экселерограмма землетрясения 17 июня 1931 г.

мо общей дефектности механизма, приводящего в движение регистрирующий диск. Кроме того периоды собственных колебаний маятников были сравнительно коротки – только около 7 сек. Поэтому ускорение, исчисленное при его помощи, ненадежно. Пренебрегая этими дефектами, при грубом вычислении обычным путем, пользуясь амплитудой и периодом главного движения и принимая, что движение было простым гармоническим, в результате ускорение движения, отмеченное на записи (А), можно считать равным примерно 120 гал., или  $0,12 \text{ g}$ .

Между тем, как это мы увидим ниже, максимальное ускорение сейсмического движения и период, вызывающий это максимальное ускорение, как правило, (особенно при сильном землетрясении), не возникает при главном движении. Наоборот, они возникают при второстепенных движениях, которые накладываются на главное, или при той части цикла главного движения, которая в действительности не гармонична. Точное определение такого ускорения и его периода по обычной сейсмограмме весьма затруднительно, если не невозможно. Этот факт сам по себе достаточно убеждает в том, что в инженерной сейсмометрии необходимо применять правильно сконструированные экселерографы; излишне говорить, что неправильно сконструированный экселерограф также бесполезен, как и обычный сейсмограф. Так как это является одним из самых важных вопросов, я в дальнейшем остановлюсь на нем подробнее. По этой причине, а также потому, что прибор был дефектен, вычисленная интенсивность не может быть принята за основу при проектировании сооружений.

Теперь посмотрим, что подсказывает в этом отношении наш предшествующий опыт. Наиболее важным предшествующим опытом является полуразрушительное земле-



**Рисунок 31** — Экселерограмма полуразрушительного землетрясения 21 сентября 1931 г. в районе горы Чичибу, в 60 км к сев.-зап. от Токио

трясение, происшедшее в Токио 20 июня 1894 г. Отличная запись этого землетрясения получена в Хонго (Hongo), расположенном в высокой части Токио; его основные движения были весьма просты по характеру. По этой записи покойный проф. Омори вычислил максимальное ускорение в верхней части города, равное приблизительно 0,05 g. Им также вычислено максимальное ускорение около 0,1 g в нижней части города, расположенной на рыхлом аллювии. Последнее значение возможно менее правильно, чем первое, так как оно получено просто на основании явления опрокидывания столбов и надгробных камней.

Установлено, что интенсивность землетрясений в нижней части города в 1,5-2 раза превышает интенсивность в верхней части. Этот факт не является опровержением вычисления проф. Омори. Далее, разрушения зданий, причиненные большим землетрясением 1923 г. в верхней части города, были несколько значительней, нежели разрушения в нижней части во время полуразрушительного землетрясения 1894 г. По этому факту можно также прийти к выводу, что

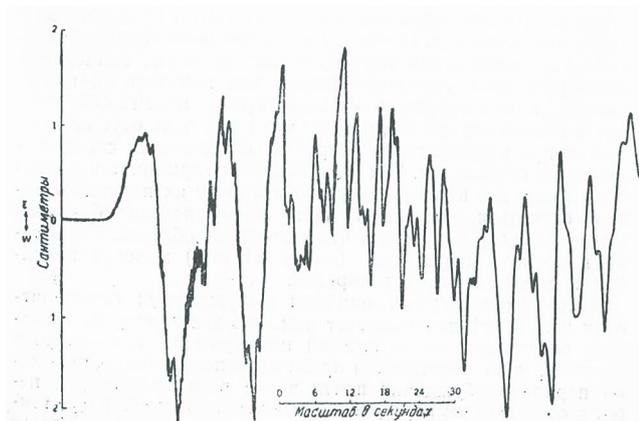
максимальное ускорение большого землетрясения в верхней части города составляло около 0,15 g. В соответствии с моим опытом в Хонго в момент наивысшей интенсивности толчка я ощущал интенсивность точно такую, какую ощущаешь в автомобиле, движущемся с умеренной скоростью по плохо мощеной дороге или в трамвае, умеренное ускорение которых, согласно измерению, произведенному проф. Ишимото и Назу при помощи экселерографа, составляет от 0,15 до 0,20 g. Итак, к сожалению, ни один регистрирующий прибор не дал надежной записи большого землетрясения 1923 г., так что истинная величина его максимального ускорения остается неизвестной, но по видимому вычисленная величина дает представление о порядке величины ускорения и нам ничего не остается, как принять его равным 0,15 g или немного более и принять к руководству при проектировании сейсмостойких зданий, памятуя в то же время, что та часть Токио, где наблюдалось сейсмическое движение, не являлась частью, подвергнувшейся наибольшему разрушению. Имеется много доказательств, свидетельствующих, что движение имело еще большее ускорение в эпицентральной области.

Особенно прискорбно, что абсолютно никаких сведений не получено об интенсивности большого землетрясения в районе нижней части города, где расположены сравнительно высокие современные каменные здания. Хотя все усилия Назу, сотрудника нашего института (тогда ассистента проф. Имамура), были направлены к тому, чтобы сравнить интенсивность одного и того же землетрясения в районах Токио, в нижней части города (по преимуществу аллювий) с интенсивностью в верхней части (по преимуществу диллювий) посредством одновременного измерения последующих толчков большого землетрясения в различных пунктах столицы, наблюдения обнаружили, что ни периоды, ни амплитуды в этих двух различных районах не находились в каком-либо определенном отношении; вообще говоря, вычисленные ускорения приблизительно на 50-100% оказались сильнее в районах нижней части города, чем в районах верхней части. Наблюдения покойного проф. Омори над полуразрушительными землетрясениями в Токио 8 декабря 1921 г. и 14 января 1923 г. дали подобные же результаты. Данные этих наблюдений даются в таблице 1.

Что касается этих данных, надо сказать, что по причинам, указанным ниже, интенсивность ускорения, вычисленная по

**Таблица 2** — Сравнение интенсивностей максимального ускорения, полученных сейсмографом и экселерографом

Землетрясение в Токио	Максимальные колебания, полученные сейсмографами					
	Полная амплитуда (в см)	Период (в сек)	Вычисл. ускорение (в гал.)	Скорость барабана	Полная амплитуда (в см)	Ускорение (в гал.)
20/VIII – 30 г.	0,042 (4S-5N)	0,30	9,2	медленное	4,14	5,6
Это же землетрясение	0,064 (4S-5N)	0,46	5,9	быстрое		



**Рисунок 32** — Сейсмограмма землетрясения 21 сентября 1931 г., полученная прибором Омори для записи сильных движений

сейсмограмме, редко правильна, так что отношения только что упомянутых интенсивностей ускорений являются просто качественными. Согласно самому последнему исследованию этой проблемы проф. Ишимото при помощи экселерографов отношение интенсивностей ускорений в низких местах к интенсивности на возвышенных местах зависит от характера землетрясения; например, при землетрясениях с медленным колебанием это отношение колеблется от 1,5 до 3, в то время как при быстром колебании это же отношение равно единице (1) или немногим более единицы. Итак, можно считать установленным, что интенсивность обычных землетрясений сильнее в низкой части города, чем в возвышенной. Однако я не могу дать правильного отношения интенсивностей большого землетрясения 1923 г. Это отношение должно бы сильно отличаться от отношения при обычных землетрясениях.

Распределение разрушенных деревянных домов во время большого землетрясения указывает, что отношение его интенсивностей в этих двух частях города также следовало этому же правилу. Интенсивность в низких частях оказалась намного сильнее, нежели в районах верхней части города, расположенной на диллювии.

Таким образом имеются все основания утверждать, что ускорение большого землетрясения в рыхлом аллювии в Токио достигло чудовищной интенсивности, примерно 0,2 g или более (осторожно приняв, скажем, 1,5 за отношение интенсивностей, только что упомянутое). Поэтому, памятуя, что столица расположена на некотором расстоянии от эпицентрального района, мы почти безошибочно можем принять, что ускорение в наихудшей местности вдоль побережья бухты Сагами, которая считалась центральным районом землетрясения, составляло более 0,3 g.

### III. Сейсмический коэффициент и недостаток сейсмических данных

Построить сооружение, могущее выдержать огромное ускорение в 0,3 g или более, при достаточном запасе прочности очевидно является делом величайшей трудности, если оно вообще выполнимо. Факты говорят, что здание, даже в наиболее сейсмическом районе, подвергается разрушительным землетрясениям по видимому только раз или самое большее два раза за свое существование. Поэтому слишком

большая прочность является только расточительностью. Принимая во внимание, что Токио не наихудшая местность, мне кажется, что правильно сконструированное здание, могущее выдержать горизонтальное ускорение в 0,15 g, при разумном коэффициенте запаса прочности благополучно может противостоять разрушительным землетрясениям с интенсивностью, равной землетрясению 1923 г., которое было наиболее сильным в истории землетрясений.

Наш собственный строительный код предусматривает горизонтальное ускорение 0,1 g, однако некоторые инженеры этим сейсмическим коэффициентом не удовлетворены и добровольно его увеличивают.

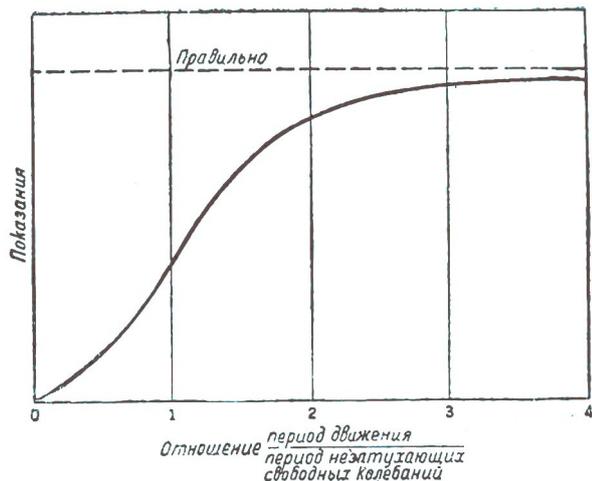
Однако, вследствие недостатка надежных сведений об интенсивности разрушительных землетрясений, я не могу это положительно утверждать. Пока мы не получим научно обоснованных данных об интенсивности и периоде разрушительных землетрясений, мы сможем конструировать сейсмостойкое здание только по допущениям, основанным на этих довольно неосновательных предположениях.

Для практической цели более ценным, чем какой-либо другой аргумент, является тот факт, что здания, спроектированные на основе 0,1 g (или около того), прекрасно выдержали такое землетрясение. В инженерном проектировании нет ничего важнее практических данных. В кораблестроении мы конструируем морской корабль в предположении, что максимальный изгибающий момент, которому корабль подвергается, возникает, когда корабль находится на «стандартной волне» (трохоидальная волна, имеющая длину корабля и высоту равную  $(1/20)$  одной двадцатой его длины), мало что зная о тех действительных волнах, с которыми ему придется столкнуться. Продолжительный опыт говорит в пользу такого предположения при условии, что мы правильно назначили «рабочее напряжение».

Если такой практический метод конструирования корабля оказывается успешным, почему бы нам не применить этот же метод в конструировании сейсмостойких сооружений? Конечно количество данных в кораблестроении несравнимо больше. Весьма вероятно, что и в данную минуту где-нибудь на океане прочность кораблей подвергается испытанию в борьбе с тяжелым штормом.

К счастью для человечества и к сожалению для сейсмологов землетрясения не случаются так часто, как спуск на воду кораблей, и поэтому наши данные в этой области весьма скудны. Наиболее современные металлокаркасные и железобетонные здания пока еще только два раза были подвержены сильным землетрясениям в истории сейсмологии – в Сан-Франциско, Калифорния, и в Токио; однако, к величайшему сожалению для науки, в обоих случаях до нас дошли лишь весьма незначительные данные об интенсивности этих землетрясений. Поэтому мы не можем воспользоваться практическими данными, полученными благодаря этим землетрясениям.

Во всяком случае мы крайне нуждаемся в большом количестве данных. Инженеры-сейсмологи должны построить сейсмографы и экселерографы для измерений сильных движений и после размещения их в сейсмических областях терпеливо ожидать будущего поступления ценных данных. Если однако условия не позволяют установить оба прибора в одном и том же месте, то надо отдать предпочтение экселерографу.



**Рисунок 33** — Зависимость между отношением периодов движения к периоду собственных колебаний экселерографа и показанием прибора

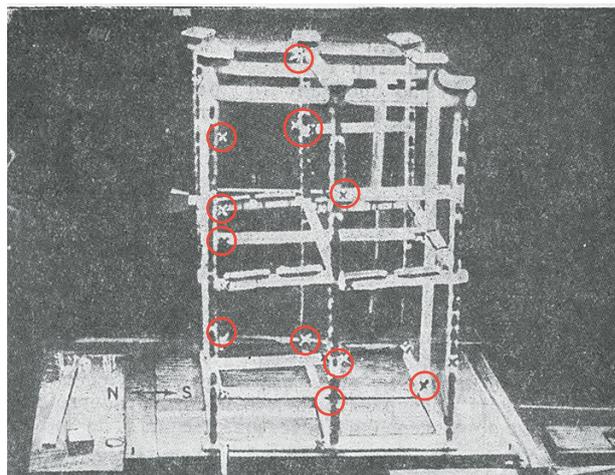
рографам. Кроме того эти приборы должны устанавливаться на участках, на которых расположены важнейшие здания, а не на специально избранных устойчивых грунтах, как это обычно делают.

В Японии со времени землетрясения 1923 г. в кругах сейсмологов остро ощущалась потребность в регистраторах сильных землетрясений. В настоящее время не только наш Институт, но также некоторые главные обсерватории снабжены сейсмографами, предназначенными для регистрации сильных землетрясений; однако, к сожалению, ни один из приборов, предназначенных для этой цели, не оборудован во всех отношениях. Например, во время недавнего землетрясения в Иду установленный в области эпицентра для измерения сильного движения сейсмограф оказался неподходящим не только вследствие чрезмерного увеличения (в 2 раза), но и потому, что предусмотренная для него максимальная амплитуда была слишком мала.

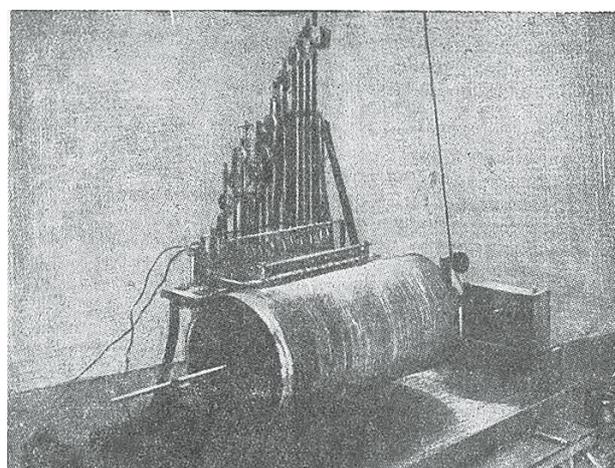
Эта неудача заставила нас взяться за это дело более серьезно, и д-р Окада (Dr. Okada), директор Центральной метеорологической обсерватории, пытается установить среди его основных наблюдательных станций более совершенные сейсмографы для измерения сильных движений. Что касается меня, то наш Институт изготовляет не только сейсмографы для измерений сильных движений, но также и экселерографы, отвечающие только что перечисленным требованиям. Так как при современном состоянии развития сейсмологии мы не можем предсказать, где произойдет ближайшее сильное землетрясение, то мы бессильны выбрать подходящее место для их установки. Если случится, что сильное землетрясение произойдет в том районе, где установлены эти сейсмографы и экселерографы, я вполне уверен, что неудача не повторится.

### III. Экселерографы

До сих пор мною рассматривался главным образом регистратор сейсмического движения, но, как я уже на основании имеющегося опыта отмечал, экселерограф, непосредственно регистрирующий ускорение землетрясения, имеет для нас большее значение; так как сейсмические волны, особенно вблизи источника землетрясения, далеко не про-



**Рисунок 34** — Механическая модель каркасно-деревянного здания (X указывает место разрушения)



**Рисунок 35** — Анализатор сейсмического колебания, сконструированный доктором Сюэхио

стого гармонического типа, то ускорение, исчисленное по обычной формуле, а именно:

$$\text{амплитуда} \left( \frac{2\tau}{\text{период}} \right)^2,$$

почти не имеет физического смысла. Больше того, в ряде случаев форма волны настолько прерывна, что даже определение самих амплитуд и периодов становится невозможным.

Надо также помнить, что максимальное ускорение часто возникает при второстепенных движениях, при сравнительно малой амплитуде, короткими периодами, которые легко затемняются главным движением. Подобными случаями особенно подчеркивается потребность в экселерографе.

Нет надобности описывать здесь принцип экселерографа, так как он описан в ряде современных учебников по сейсмологии; однако не лишено интереса для вас посмотреть некоторые результаты сравнения интенсивности максимального ускорения землетрясений, полученной непосредственно экселерографом и вычисленной по записям сейсмографа (см. табл. 2).

Применен был экселерограф, сконструированный проф. Ишимото; особенности его нижеследующие:

1. Тип – обращенный маятник и оптическая запись.
2. Вес маятника – 3,2 кг.
3. Период собственных колебаний без затухания – 0,08 сек.
4. Уменьшение значения ( $\text{см}/\text{сек}^2$ ) затухающего качания – около 30.
5. Оптическое увеличение колебания центра маятника в 1700 раз.

1 см амплитуды на записи соответствует  $2,7 \text{ см}/\text{сек}^2$ . Впоследствии этот прибор был приспособлен для инженерных исследований. Для этой цели увеличение было понижено до пределов, требующихся для механической записи, а период собственных колебаний маятника соответственно увеличен. Его особенности нижеследующие:

1. Период собственных качаний без затухания – 0,15 сек.
2. Затухание близко к критическому.
3. Постоянная показаний – 1 см, приблизительно  $10 \text{ см}/\text{сек}^2$ .

Теперь конструируется прибор для регистрации сильных землетрясений с постоянной показаний в  $1 \text{ см} = 50 \text{ см}/\text{сек}^2$ .

Для сравнения на рис. 26, 27, 28 показаны записи упомянутого в таблице 2 землетрясения, полученные оптическим экселерографом Ишимото, обычным сейсмографом и сейсмографом этого же типа, но с быстро вращающимся барабаном. На рис. 26 и 27 знаком 4 S – 5N отмечены колебания, по которым вычислены значения ускорения в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что значение, вычисленное по диаграмме со сжатой шкалой времени, т. е. при медленном вращении барабана (верхний ряд), совершенно ошибочно, в то время как вычисленное по диаграмме с расширенной шкалой времени при быстром вращении барабана (средний ряд) менее ошибочно. Это обстоятельство также указывает на то, что быстро вращающийся барабан в сейсмографе весьма желателен, если он используется для получения данных, нужных для инженеров.

Но и такой сейсмограф не может в некоторых случаях осуществить нашей цели. В предыдущем изложении мною иллюстрировались записи одного землетрясения, сейсмические волны которого состояли из сравнительно регулярных рядов почти гармонических движений, и поэтому без особой погрешности мог быть применен обычный метод вычисления ускорения. Надо помнить, что даже в таком исключительно благоприятном случае, обычная сжатая диаграмма (при скорости записи менее  $6 \text{ см}/\text{сек}$ ) может привести к ошибочному результату. В качестве другого примера для сравнения я приведу сейсмограмму землетрясения и его же акселерограмму, записанную механическим экселерографом Ишимото (рис. 29). Это землетрясение показало те характерные черты, которые обычно наблюдаются, а именно: главное движение имеет большую амплитуду, но сравнительно длинный период и на них накладываются второстепенные движения. Очевидно, что точное вычисление ускорения, равно и «периодов ускорения» (промежутков между двумя последовательными максимумами ускорения), почти невозможно. Таким образом сейсмограф почти бесполезен для определения двух важных моментов, столь необходимых инженеру, в то время как их можно определить при помощи экселерографа.

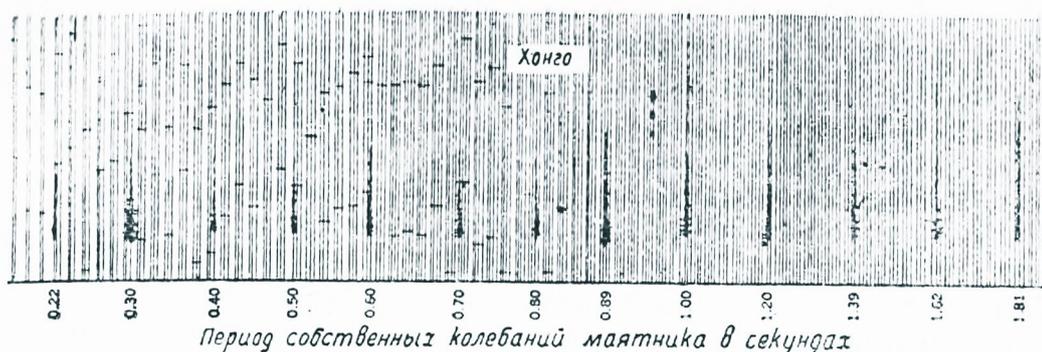
Хотя эти экселерографы только недавно установлены в нашем Институте, так как последующие толчки большого

землетрясения 1923 г. в последнее время часто происходили в прилегающем к области разрушения районах, нам все же удалось получить при их помощи ценные сведения о двух весьма сильных землетрясениях. Одно сильное землетрясение произошло 17 июня 1931 г., с эпицентром около 40 км к северу от Токио. Диаграмма его ускорения, записанная механическим экселерографом Ишимото воспроизведена на рис. 30. На рис. 30 также показана запись сейсмографа, оборудованного автоматическим пуском и дающего расширенную диаграмму. Из рисунка видно, что резкое движение, вызывавшее максимальное ускорение, не является явно основным движением, подобно bcde, но более вероятно, что оно вызвано второстепенным движением, ab, или той частью основного движения, bc, на которую, весьма вероятно, наложилось второстепенное движение. Тем не менее даже по этой расширенной диаграмме (рис. 30) весьма трудно вычислить и интенсивность и период ускорения. Еще более трудно сделать вычисление по обычной сжатой сейсмограмме. Так, один опытный сейсмолог вычислил по записи сейсмографа, применяемого геофизиками, максимальное ускорение этого землетрясения равным 25 гал. и его период – 2,1 сек. Между тем в действительности максимальное ускорение его северо-южного компонента движения составляло 43 гал., а его период – 0,4 сек., как это зарегистрировано экселерографом, тщательно выверенным как статически, так и динамически.

Другое землетрясение, экселерограмма которого была удачно записана в нашем Институте, произошло 21 сентября 1931 г. в районе горы Чичибу на Сев. Мусаши, около 60 км к северо-западу от Токио. Это землетрясение было полуразрушительным и в районе аллювия причинило гибель 16 чел. и разрушило 76 домов; однако в районе, более близком к эпицентральной области, имеющем грунт твердого палеозоического образования, никаких несчастных случаев не было отмечено. Это землетрясение вызвало весьма сильное колебание в Токио, хотя никаких серьезных повреждений в Токио не произошло, если не считать нескольких трещин мостовой в низменных местах.

Экселерограмма этого землетрясения воспроизведена на рис. 31 для сравнения с сейсмограммой (рис. 32), полученной регистратором сильных движений Омори. Надо отметить, что это землетрясение произошло в жаркий день, в виду чего масляный глушитель экселерографа оказался несколько непригодным, но не в такой степени, чтобы сделать запись ненадежной. Рисунок показывает, что восточно-западный компонент ускорения составляет около 70 гал., а его период около 0,4 сек. Сейсмограмма однако не дает полезных сведений, если не считать величины смещения грунта во время главного движения, примерно в 3,5 см. Интересно отметить, что в Токио не было никаких разрушений, несмотря на то, что ускорение достигло такой интенсивности, при которой восточно-западный компонент составил 70 гал., а другой компонент – 60 гал. (экселерограмма северо-южного компонента не показана).

Хотя относительная фаза компонентов ускорения не могла быть обнаружена, так как барабан экселерографа вращался медленно и таким образом интенсивность максимально-равнодействующего ускорения осталась неизвестной, все же несомненно, что эта интенсивность ускорения была в пределах от 70 до 92 гал. ( $\sqrt{70^2 + 60^2}$ ).



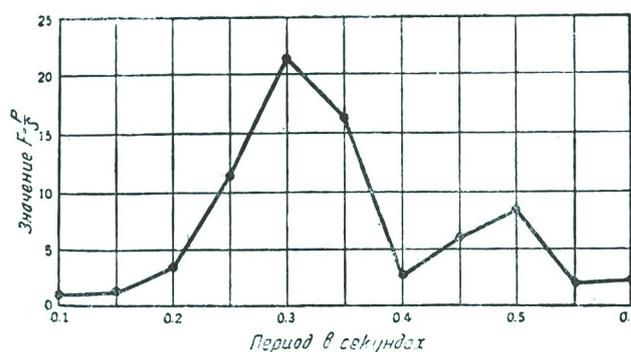
**Рисунок 36** — Типовая запись анализатора колебаний Сюэхиرو в Хонго, в верхней части Токио

Эта интенсивность соответствует силе – IX баллов по сейсмической шкале Канкани (Cancani). Поэтому, если бы сейсмологи оказались правы, это землетрясение должно было бы вызвать катастрофу, но на самом деле катастрофы не было. Указанный факт достоин специального внимания инженеров-сейсмологов.

Таким образом моя точка зрения, что ускорение большого землетрясения 1923 г. в верхней части города Токио составляло более 0,15 g, в противоположность общему утверждению, что оно составляло 0,1 g, по видимому подтверждается данными наблюдения описанного выше землетрясения. Ко времени этого землетрясения в низменной части был установлен другой подобный экселерограф, но к несчастью он не мог дать записи вследствие поломки регистрирующего пера от толчка, подтверждая этим самым тот факт, что интенсивность в нижней части города была значительно сильнее, чем в верхней части.

Надо отметить, что не только воспроизведенные записи (рис. 29, 30, 31) этих трех землетрясений, но и все записи ускорения, полученные до сих пор, указывают на то явление, что период ускорения не совпадает с периодом движения, как это очевидно из сейсмограммы. Это вполне естественно, если принять во внимание только что сказанное о главных и второстепенных сейсмических движениях. При определении интенсивности землетрясения обычно дается амплитуда и период самого выдающегося движения; но, как правило, такое движение не вызывает максимального ускорения и оно редко проявляется в экселерограмме, как преобладающий компонент ускорения.

Кроме того в соответствии с нашим опытом в верхней части Токио (Хонго), где расположен наш Институт, весьма вероятно, что при всех землетрясениях период ускорения основного движения оставался в пределах примерно от 0,3 до 0,4 сек., не взирая на то, что период главных волн основного движения изменяется в широких пределах. Это ясно видно из рис. 29, 30 и 31. В виду этого следует отметить, что Хонго обычно подвержено микродрожаниям в обыкновенное время, и во время землетрясений обычными движениями с периодом в 0,3 сек или около этого; этот-то период преимущественно и проявляется в ускорениях. Поэтому, хотя я и не могу этого утверждать положительно, сейсмические движения с преобладающим ускорением вызываются по всей вероятности обычными движениями, присущими этому району.



**Рисунок 37** — Распределение различных периодов колебаний (F = распространенность колебаний, P = период, S = стандартный период в 0,3 сек)

Чтобы проверить, следуют ли тому же правилу другие районы, недавно был установлен экселерограф Ишимото в Марюнучи (Marunouchi), деловом центре Токио, расположенном в низменной части, где мною изучались колебания в грунте как в обычное время, так и во время землетрясений. Так как мы еще не получили достаточного количества экселерограмм в этом районе, еще слишком рано делать какие-либо положительные выводы; однако почти с уверенностью можно сказать, что эти выводы не будут противоречить результатам исследований в возвышенной части города. Весьма важно отметить, что в низменной части период ускорения землетрясения примерно «умеренной» интенсивности нередко близок к 0,7 сек, в то время как при незначительных землетрясениях, принадлежащих к классу «слабых», период ускорения обычно 0,2 сек или 0,4 сек, соответственно их интенсивности. Эти три различных периода соответствуют периодам обычного движения грунта.

Таким образом на основе новейшего опыта мы должны радикально изменить наши взгляды на сейсмические движения. Амплитуда и период главных основных движений, полученные по сейсмограмме, вообще не имеют большого значения для инженера. Необходимыми для него данными являются ускорение и его период, непосредственно записанные экселерографом, приспособленным для инженерных целей.

Здесь я подчеркиваю: «экселерограф, приспособленный для инженерных целей», потому что наша цель осуществима только при помощи экселерографов, обладающих соответствующими свойствами. Так как ускорение гармонических

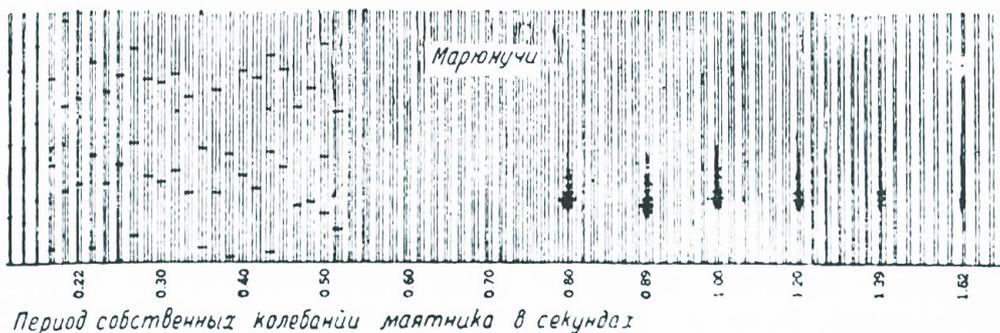


Рисунок 38 — Типовая запись анализатора вибраций Сюэхиро в Марюнучи в низкой части Токио

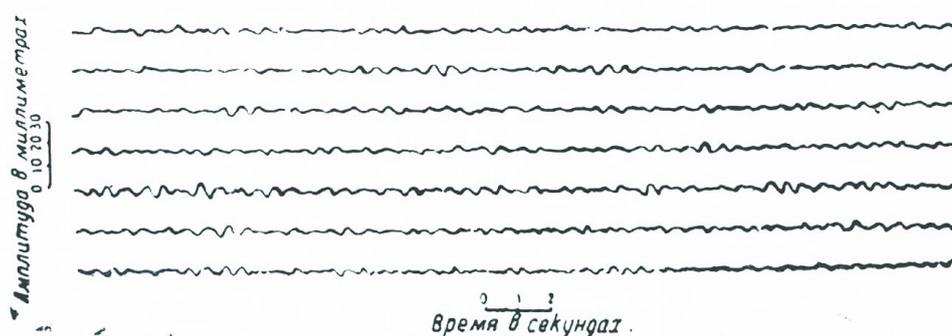


Рисунок 39 — Запись микровибрации в низкой части Токио микровибрографом Ишимото

движений обратно пропорционально квадрату их периодов, может случиться, особенно при землетрясении близкого и не глубокого источника, что движения, обладающие весьма короткими периодами (менее 0,1 сек) вызовут максимальное сейсмическое ускорение.

Далее, элементарный принцип вынужденных гармонических колебаний подсказывает нам, что экселерограф, имеющий глушитель, составляющий примерно 0,7 критического значения, даст практически правильное показание, если только период возбуждения почти в два раза превосходит период собственных незатухающих колебаний прибора; а также, что он дает уменьшенное показание более быстрых движений. В основных чертах это показано на рис. 33. Поэтому, если использован экселерограф, имеющий весьма короткий период собственных колебаний, какой иногда применяется для геофизических исследований, тогда полученная запись может быть только рядом исключительно резких волн, делая обнаружение более важных компонентов практически невозможным.

Колебания, обладающие крайне короткими периодами, не представляют интереса для инженеров-строителей, в то время как движения, обладающие несколько более длинными периодами, большими чем 0,3 сек или около этого, являются весьма важными. Поэтому для инженерных целей должны применяться экселерографы, обладающие соответствующим периодом 0,15 сек или около этого; если применяются экселерографы с другим периодом, то запись движений, в которой мы заинтересованы, будет замаскирована менее важными быстрыми движениями и она окажется

такой же плохой, как и сжатая запись сейсмографа, в которой, наоборот, важные волны затемняются **медленными** главными движениями.

Возвратимся к обсуждаемому вопросу. Общий вопрос о таком обычном движении находится «все еще в подсознании». Для нас весьма серьезен тот факт, что период ускорения землетрясений в возвышенной части Токио находится по большей части в пределах от 0,3 до 0,4 сек. Особенно важно это потому, что каменные здания в возвышенной части, будучи обыкновенно трех или четырехэтажными, имеют обычно, как это будет показано ниже, период собственных колебаний того же порядка и значения, что и у землетрясений. Нас также смущает то обстоятельство, что низменная часть в Токио, где расположены сравнительно высокие восьми и более этажные здания, часто имеет период ускорения около 0,7 сек, так что период свободного колебания таких зданий, если только они не построены особенно прочно, почти совпадает с периодом ускорения грунта.

Я недостаточно осведомлен о характере сейсмических движений в Соединенных Штатах. Вероятно он не очень отличается от характера сейсмических движений в Японии. Если это так, то небоскребы, имеющие обыкновенно большой период собственных колебаний, более 2 сек, в этом отношении имеют значительные преимущества. Я не вижу причины, почему они иногда умышленно строились более упругими, невзирая на то, что они сами по существу своему упруги.

Тем не менее я хочу подчеркнуть, что применение экселерографа крайне необходимо для получения инженерных данных о землетрясении; для нашей цели он намного

превосходит сейсмограф. Несомненно, что последующее изучение сейсмологии при помощи экселерографа может дать нам открытия, которые заставят нас изменить некоторые из общепринятых взглядов. Чтобы экспромтом на примере показать ошибочность одного взгляда, я возьму хорошо известную сейсмическую шкалу Канкани, дающую сейсмические ускорения и соответствующее им повреждение зданий. Доверие некоторых сейсмологов к этой шкале интенсивности настолько велико, что они до смешного искажают вычисления ускорения с целью привести их в соответствие со шкалой. Интенсивности ускорения, даваемые средней частью шкалы, исчислялись вероятно по главному движению, зарегистрированному в сейсмограмме, и поэтому являются весьма мало ценными. Шкала должна быть пересмотрена. В отношении рассматриваемой проблемы я высоко оцениваю работу проф. Ишимото по конструированию простого экселерографа и по разработке им ценных данных по инженерной сейсмологии.

Изобретенный Вудом (Wood) и Андерсоном (Anderson) в Соединенных Штатах Америки сейсмограф оказывается одним из лучших приборов для применения в качестве экселерографа, и я очень рекомендую его распространение для установки во всех сейсмических районах как непосредственно на грунте, так и в основных зданиях.

#### V. Период собственного колебания грунта

Едва ли есть необходимость утверждать, что период сейсмического движения или, более точно, период ускорений играет важную роль в разрушительном действии землетрясения на здания и другие сооружения. Поэтому важно исследовать период обычного движения, свойственного грунту как в обычное время, так и во время землетрясений, если только подобное движение действительно существует. На первый взгляд покажется весьма странным говорить о периоде колебания грунта, когда грунт практически имеет неограниченное протяжение во всех направлениях, но если мы вспомним, что грунт такого района, как Токио, осадочного образования и состоит из многих напластований, то нетрудно будет понять существование периода движения, свойственного этому району. В своем математическом труде, озаглавленном «Возможность свободного колебания поверхностного слоя, возбужденного сейсмическими волнами», проф. Сезава (K. Sezawa) показал, что движения могут иметь собственный период колебаний, свойственный поверхностному слою слоистой земной коры, а также, что этот период зависит от характера земной коры, образующей наслоения, а также от толщины поверхностного слоя. Эту возможность подтверждает не только математическое решение, но и наблюдения фактически показали существование этих обычных движений грунта.

Для установления преобладающего периода землетрясения в какой-либо местности мною применялся мною же спроектированный анализатор сейсмических вибраций. Этот прибор работает по принципу отбора колебаний посредством резонанса, как и хорошо известный измеритель частоты Гартмана (Hartmann). Как показано на рис. 35 анализатор состоит из некоторого числа соединенных маятников, имеющих различные периоды собственных колебаний; самый короткий из периодов составляет 0,2 сек, а самый

длинный – 1,8 сек; все они установлены бок о бок в одном ряду вдоль барабана. Каждый маятник снабжен отдельным водяным глушителем, заглушающим свободное колебание, а каждый глушитель приспособлен таким образом, чтобы производить практически одинаковое увеличение амплитуды резонирующей вибрации каждым из записывающих перьев. Прибор, показанный на рис. 35, хотя и весьма неуклюж по внешнему виду, все же работает удовлетворительно. Нами предпринято конструирование нового прибора меньших размеров и более совершенного по внешнему виду.

Типовая запись этого прибора, полученная в Хонго, показана на рис. 36.

На этой диаграмме числа показывают периоды собственных колебаний маятников. Запись ясно доказывает, что преобладает только движение, имеющее период 0,3 сек и что это движение вероятно гармонического типа. Другие движения дают просто незаметные, неправильные зазубренные неровности. Эта картина характерна для всех землетрясений в Хонго, независимо от их интенсивности и отдаленности от источника.

Поэтому можно прийти к заключению, что этот район обладает периодом собственных колебаний равным около 0,3 сек. Когда мы с проф. Ишимото измеряли колебание низких монолитных зданий ртутным трубчатый микровибрографом, сконструированным нами, мы получали одновременно записи микродрожаний грунта, на котором находились здания. В одном случае мы получили запись микродрожаний в северной части Хонго. Анализируя те части записи, которые не были нарушены сильным уличным движением, я получил кривые, показывающие частоту движений, имеющих различные периоды; одна из кривых показана на рис. 37. Диаграмма показывает, что движение с периодом 0,3 сек, имеет максимальную частоту. Подобное же наблюдение было произведено позднее проф. Ишимото и проф. Такахаши при помощи микровибрографа Ишимото в парке нашего Института, расположенном в 2 км к югу от упомянутого места. Там наблюдалось точно такое же поведение грунта.

Таким образом можно отметить, что Хонго в повышенной части Токио имеет обычное движение с периодом около 0,3 сек как в обыкновенное время, так и во время землетрясений, и весьма вероятно, что преобладающие ускорения в землетрясениях обязаны этим движениям.

Мною закончены такие же наблюдения в Марюучи в пониженной части Токио. Там обстоятельства не так просты, как в Хонго. Анализатор сейсмической вибрации указывает, что преобладающими периодами в землетрясениях являются обыкновенно периоды от 0,7 до 0,9 сек (в записи, показанной на рис. 38, преобладает период 0,8 сек). Это вполне соответствует тому, что период ускорения умеренных землетрясений в этом районе иногда бывает около 0,7 сек или более; однако, как показано на рис. 39 (являющемся репродукцией записи микродрожания, полученной проф. Такахаши, Сато (Sato) и мною при помощи микровибрографа Ишимото) преобладающий период микродрожания в этом районе составляет от 0,4 до 0,45 сек, что равно почти половине преобладающего периода во время землетрясения. На это накладываются некоторые движения, имеющие меньшие амплитуды и периоды, варьирующие от 0,2 до 0,3 сек. Памятуя, что периоды ускорения слабых землетрясений в

нижней части Токио составляют иногда от 0,2 до 0,4 сек, можно прийти к выводу, что, смотря по обстоятельствам, второстепенные и третьестепенные свободные колебания этого района вызваны слабыми, но резкими землетрясениями.

Итак, этот район замечателен тем, что здесь существуют второстепенные и третьестепенные собственные колебания, имеющие собственные частоты, превосходящие в 2–3 раза колебания, являющиеся там по видимому основными. Подобное поведение грунта не вытекает из математического решения для упругого грунта, данного проф. Сезава. Так как район был когда то болотистым, и почва еще и теперь илистая, то ее справедливо считать полужидкой. Если это так, то район Токио, в котором весьма неправильны поверхностные и глубинные напластования, должен был бы иметь сложную периодичность гармонического порядка, точь в точь как вода в резервуаре. По моему вычислению основное колебание имеет период около 0,8 сек, но этот период слишком велик, чтобы он мог быть вызван уличным движением или другими незначительными возбудителями; и только в случае сейсмических возбуждений, имеющих период около 0,8 сек, ясно обнаруживаются основные колебания. Я не имею возможности однако углубляться дальше в этот вопрос и оставляю его освещение компетентным исследователям.

Единственно, что я хочу подчеркнуть, это то, что каждая местность во время землетрясения имеет свое собственное свободное колебание и мы должны относиться к этому с большим вниманием.

## VI. Измерение напряжения в зданиях во время землетрясений

Относительно расчета прочности зданий и других сооружений во время землетрясения я предпочел бы ничего не говорить, ибо эта страна (Америка) является родиной большинства расчетных методов. Однако, какой выработанный метод мы бы ни применили, делом величайшей трудности является вычисление точных напряжений и деформаций, возбужденных данной сейсмической силой в элементах сложного статически неопределимого сооружения, особенно, когда такое сооружение имеет диагональные связи, внутренние стены и т. п.

Кроме того важным является рассмотрение других значительных моментов, например, отношение между пе-

риодом собственных колебаний сооружения и периодом ускорения, затухание колебаний, взаимодействие между фундаментом сооружения и основанием и т. д. (некоторые из этих вопросов будут служить темой нашей III лекции). Если мы примем в соображение все эти обстоятельства, мы должны будем прийти к выводу, что точный расчет сооружения на прочность фактически невозможен.

Шагом вперед в этом направлении является производство опытов с моделями, удовлетворяющими закону динамического подобия. Я произвожу теперь опыты по простым деревянным рамным сооружениям на динамической модели, сделанной из смеси парафина и других материалов (см. рис. 34). Предварительный отчет об этих опытах опубликован.

Опыты еще не закончены и многое еще надлежит выяснить, но мне кажется, что на успех есть большая надежда. Что же касается сооружений из составных материалов, например, железобетонных и каркасно-стальных кирпичных сооружений, я не уверен в успешности опытов с моделями.

Другое дело, возможное в сейсмической области, это – установка некоторого числа тензометров в типовых зданиях и одновременное производство наблюдений экселерографом.

Такие наблюдения нам могут показать, что пока наблюдаемые напряжения не выходят за пределы упругости, они по известному ускорению могут быть вычислены. К счастью, период ускорения во всех районах практически постоянен. Поэтому мы можем вычислить, при какой интенсивности землетрясения в элементах конструкции превышает предел упругости (в стальных сооружениях) или появляются трещины (в каменных сооружениях), хотя по понятным причинам мы не можем подсчитать силы, вызывающей разрушения стальных сооружений; для этого расчеты равным образом невозможны.

Я сожалею, однако, что будучи весьма занят происшедшими недавно одно за другим сильными землетрясениями, о чем мною упоминалось в лекции I, я не мог полностью посвятить свои исследования разрешению этих проблем. В настоящее время я имею только один тензометр, установленный в низком деревянном здании. Данные о таком здании вам явно бесполезны, но я намерен вскоре распространить измерение деформаций на многоэтажные здания и я надеюсь, что в ближайшее же время я буду в состоянии опубликовать данные, касающиеся таких зданий.



## ПАМЯТИ КИРИЛЛА ЛЕВИ



В Иркутске 13 октября 2018 года на 72-м году жизни скончался доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент Российской академии естественных наук, профессор, руководитель научного направления в институте, крупный специалист в области кайнозойской геодинамики, сейсмогеодинамики литосферы континентов, неотектоники и современной геодинамики, заведующий лабораторией кайнозоя Института земной коры СО РАН, профессор ИГУ и ИРНИТУ Кирилл Леви.

Кирилл Георгиевич Леви автор и соавтор более 220 научных работ, в том числе восьми неотектонических карт, 14 монографий. Внес существенный вклад в методическую основу неотектоники. В 1995 году по инициативе Леви геофизиками ИЗК СО РАН была разработана прикладная научно-техническая программа «Сейсмобезопасность Сибири». В 2002-2006 годах участвовал в обсуждении различных вариантов прокладки нефте- и газопроводов в Восточной Сибири. В 2006-2007 го-

дах Кирилл Георгиевич совместно с сотрудниками лаборатории инженерной геологии и геоэкологии ИЗК СО РАН развивал идеи оценки риска деформаций и разрушения строительных сооружений различного назначения. С 2000 года он вместе с созданным им неформальным междисциплинарным коллективом исследователей из Иркутского научного центра СО РАН, ИГУ и ИРНИТУ разрабатывал новое научное направление «гелиогеодинамика».

Светлая память о Кирилле Георгиевиче Леви навсегда сохранится в сердцах всех, кому посчастливилось работать с ним – высоким профессионалом и прекрасным человеком.

*Российская Ассоциация по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий (РАСС)  
Редколлегия журнала «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений».*