



Я. М. АЙЗЕНБЕРГ

### **Памяти Якова Моисеевича Айзенберга**

22 апреля 2018 года исполнится год, как ушел из жизни Яков Моисеевич Айзенберг, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный строитель РФ, почетный академик РААСН, научный руководитель ЦИСС ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», главный редактор журнала «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений».

В память о выдающемся ученом, многолетнем бессменном главном редакторе нашего журнала, редколлегией было принято решение о ретроспективе публикаций Я.М. Айзенберга.

Сегодня мы предлагаем Вашему вниманию статью Якова Моисеевича «Строительная наука против стихии», опубликованную в журнале «Природа» (№ 12, 1989 год). Несмотря на почти три десятка лет, прошедших с момента публикации, статья по-прежнему актуальна и читается с большим интересом.

## СТРОИТЕЛЬНАЯ НАУКА ПРОТИВ СТИХИИ

*Как избежать опасного резонанса в строительстве в сейсмоопасных регионах, когда нет полной информации о сейсмических условиях? Одним из возможных способов сейсмозащиты в условиях неопределенности такого типа являются адаптивные системы, периоды собственных колебаний которых могут меняться в процессе сейсмического воздействия.*

**Ключевые слова:** сейсмология, строительство, резонанс, безопасность, землетрясение, экспериментальные исследования.

Сейсмология еще не умеет сколько-нибудь точно предсказывать место, время и интенсивность землетрясения, но строители должны проектировать и везде строить такие сооружения, чтобы они не разрушались при любом землетрясении. Эта мысль в той или иной форме присутствует в многочисленных публикациях сейсмологов, появившихся после Спитакского землетрясения. Она прозвучала и на Общем собрании АН СССР в выступлении вице-президента Н. П. Лаверова, информация о котором

вышла под заголовком «Катастрофы непредсказуемы, но нужно научиться встречать их во всеоружии» (Известия. 1989. 2 янв.). В том же ключе высказался Г. А. Соболев в статье, темпераментно озаглавленной «Чего еще не можем, что уже обязаны сделать» (Московские новости. 1988. 18 дек.).

В публикации Н. В. Шебалина (Наука и жизнь. 1989. № 4) раздел «Перспектива краткосрочных сейсмических прогнозов в СССР» весьма красноречиво состоит из единственного предложения: «Никаких перспектив таких прогнозов в настоящее время нет».

Как бы подтверждая эту пессимистическую оценку, А. А. Баталин в ереванской газете «Коммунист» пишет: «Важно не предсказать, когда будет разрушен город, а построить его там и так, чтобы он не был разрушен».

Так ли это? Могут ли строители построить сейсмостойкий дом, не имея сейсмологической информации, независимо от сейсмологической ситуации? Если могут, то какой ценой? Как специалисты в области сейсмостойкости отвечают на этот вызов сейсмологов или, точнее, природы? Как создают системы сейсмозащиты в условиях неполной сейсмологической информации?

Анализ причин массовых разрушений инженерных сооружений при Спитакском и других сильных землетрясениях и, разумеется, весь предыдущий опыт и теория сейсмостойкого строительства могут помочь ответить на эти вопросы.

### **АЗЫ СЕЙСМОСТОЙКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Злополучной ночью 1976 г. большой китайский город Таншань, расположенный недалеко от Пекина, за несколько секунд был до основания разрушен сильнейшим землетрясением. Погибли сотни тысяч жителей. Токио и Сан-Франциско, Мессина и Мехико, Ашхабад и Бухарест, Ташкент и Ленинакан, – названия этих городов стали символами страшных бедствий, причиненных землетрясениями только в этом столетии.

По данным ЮНЕСКО, землетрясениям принадлежит печальное лидерство – они занимают первое место среди стихийных бедствий по причиняемому ими экономическому ущербу и одно из первых мест по числу человеческих жертв.

Четверть территории СССР расположена в особо опасных с сейсмической точки зрения районах. Но доля строительства в этих районах в общем объеме капитального строительства гораздо выше и продолжает возрастать в связи с тем, что они расположены в таких богатых сырьевыми ресурсами регионах, как Кавказ, Средняя Азия, Восточная Сибирь, Дальний Восток. Для сооружений, к которым предъявляются повышенные требования по сейсмической безопасности, – атомных электростанций, зданий взрывоопасных и химических производств – зона сейсмоопасности расширяется, составляя, по данным АН СССР, около 40 % территории страны.

Человечество с давних пор стремилось противостоять подземным ударам. Некоторые способы сейсмозащиты сооружений – использование вязких, пластичных растворов на основе смол, битумов или же свинца для кладки стен, устройство вязких подушек в основании зданий – были известны еще древним зодчим, успешно применявшим их при строительстве дворцов, мавзолеев, храмов. Однако рядовые, никак не защищенные постройки при землетрясениях, как правило, разрушались, приводя к гибели десятков и сотен тысяч людей.

Строительная практика на основе многолетнего опыта и новейших достижений науки привела к выработке норм, которые помимо правильного расчета требуют соблюдения ряда общих принципов конструирования.

Если сгруппировать конструктивные типы зданий по степени их сейсмостойкости, то на первое место следует поставить крупнопанельные дома, монолитные железобетонные здания, дома с металлическим или железобетонным каркасом и с железобетонными диафрагмами и ядрами жесткости. Следом за ними идут, пожалуй, здания с железобетонными включениями в каменные или кирпичные стены. И, наконец, последнее место занимают каменные или кирпичные здания. Эта иерархия довольно условна – в некоторых случаях порядок мест может оказаться иным.

Конечно, сейсмозащита непременно требует высокого качества строительных работ, что, к сожалению, далеко не всегда соблюдается. И это нарушение – самая распростра-

ненная, наряду с ошибочным прогнозом интенсивности, причина тяжелых последствий землетрясений. Сегодня контроль качества и сама система организации строительства явно неудовлетворительны, они требуют гораздо больших усилий и затрат для получения должного эффекта.

Строительная практика на основе многолетнего опыта и новейших достижений науки привела к выработке норм, которые помимо правильного расчета требуют соблюдения ряда общих принципов конструирования.

Если сгруппировать конструктивные типы зданий по степени их сейсмостойкости, то на первое место следует поставить крупнопанельные дома, монолитные железобетонные здания, дома с металлическим или железобетонным каркасом и с железобетонными диафрагмами и ядрами жесткости. Следом за ними идут, пожалуй, здания с железобетонными включениями в каменные или кирпичные стены. И, наконец, последнее место занимают каменные или кирпичные здания. Эта иерархия довольно условна – в некоторых случаях порядок мест может оказаться иным.

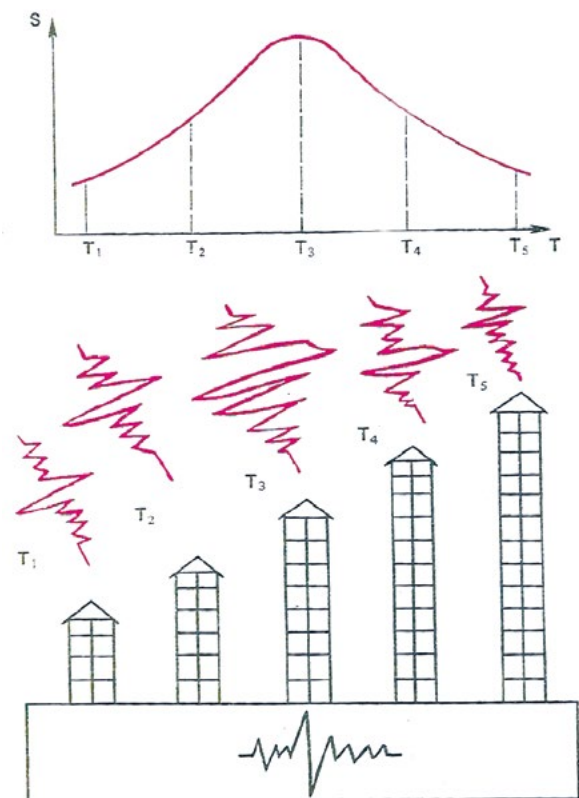
Конечно, сейсмозащита непременно требует высокого качества строительных работ, что, к сожалению, далеко не всегда соблюдается. И это нарушение – самая распространенная, наряду с ошибочным прогнозом интенсивности, причина тяжелых последствий землетрясений. Сегодня контроль качества и сама система организации строительства явно неудовлетворительны, они требуют гораздо больших усилий и затрат для получения должного эффекта.

Заметим, что смысл мероприятий по обеспечению сейсмостойкости вовсе не в том, чтобы при любом землетрясении здание осталось целым и невредимым – такого добиться практически невозможно. Задача заключается в том, чтобы при самых интенсивных подземных толчках (скажем, при 9-балльном землетрясении в 9-балльном районе) допустить в конструкциях лишь локальные повреждения при обязательном условии: обеспечить с высокой вероятностью безопасность населения. Какова эта вероятность, каков допустимый сейсмический риск – это разговор особый.

В принципе, речь идет о том, чтоб решить две взаимосвязанные и одновременно противоречивые задачи: с одной стороны, обеспечивая высокую сейсмостойкость зданий, обезопасить находящихся в них людей, с другой – не доводить стоимость антисейсмических усиления до чрезмерных пределов, ибо ресурсы любого общества, которые могут быть направлены на снижение сейсмического риска, как, впрочем, и других видов риска, ограничены.

### **ТЕОРИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ, СЕЙСМИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ И НАГРУЗКИ НА СООРУЖЕНИЯ**

К теоретическому осмыслению принципов сейсмозащиты пришли сравнительно недавно. Первые методы расчета и нормы проектирования сейсмостойких конструкций родились в начале XX в., после крупных землетрясений в Японии и Италии. Сам расчет на сейсмические нагрузки выглядел на первых порах весьма просто. Считалось, что на сооружение в горизонтальном направлении действует одна десятая часть его массы, и затем выполнялся расчет на прочность.



**Рисунок 1** — Спектр сейсмической реакции 5 зданий. Он представляет собой зависимость максимальных ускорений, смещений или иных параметров движения точек различных зданий (условные акселерограммы показаны цветными кривыми на рисунке внизу) от периода их собственных колебаний  $T$ . Реакция максимальна у зданий, периоды собственных колебаний которых близки к преобладающим периодам колебаний грунта  $T_3$  (акселерограмма землетрясения с максимумом колебаний при  $T=T_3$  представлена на рисунке внизу черной кривой).

По существу такой подход предполагал, что сооружение перемещается как абсолютно жесткое тело вместе с грунтом и, естественно, ускорения всех его точек и грунта равны между собой. Этот подход отражал господствующее в то время убеждение, что землетрясениям присущи «медленные», куда более длиннопериодные колебания грунта, чем собственные колебания зданий. По мнению известного японского ученого Т. Суэхиро, периоды колебаний грунта 1-2 следовало считать преобладающими при землетрясениях. Такое утверждение можно объяснить отчасти тем, что на первых порах измерения при землетрясениях производились лишь сейсмографами, которыми регистрировали смещения грунта, и не записывали ускорений. Дело в том, что на записях смещений (сейсмограммах) визуально выявляются длиннопериодные колебания, а на записях ускорений (акселерограммах) – колебания с короткими периодами.

В первые десятилетия XX в. в Японии, а затем и в других странах в строительстве получила распространение концепция высокой сейсмостойкости жестких монолитных железобетонных зданий с ячеистой структурой, достигаемой большим количеством внутренних стен. Периоды  $T$  собственных колебаний таких зданий (0,1-0,3 с) были меньше предполагавшихся периодов сейсмических колебаний (1-2 с). И это считалось важным фактором их сейсмостой-

кости, поскольку при таких условиях исключалась возможность резонансных явлений.

В 30-е годы после разрушительных землетрясений в Калифорнии (США) Береговой и геодезической службой этого штата была проведена широкая программа исследований, в ходе которых, с одной стороны, регистрировались ускорения грунта при землетрясениях (новыми, специально созданными приборами – акселерографами), а с другой – фиксировались собственные колебания зданий. Выяснилось, что преобладающие периоды колебаний грунта при калифорнийских землетрясениях соответствуют диапазону 0,2-0,3 с, а не 1-2 с, как считалось ранее. Иными словами, периоды сейсмических колебаний оказались близки к периодам собственных колебаний большинства зданий высотой в 4-5 этажей, которые как раз и составляли в те годы основу массового строительства.

Естественно, возникла мысль о возможности резонанса и, следовательно, о динамических нагрузках, в несколько раз превышающих нагрузки, определенные статическим методом. Это предположение подкреплялось тем, что разрушения в Калифорнии оказались куда значительнее расчетных. К такому же выводу пришли советские специалисты после разрушительного Ашхабадского землетрясения 1948 г. Все это привело к тому, что в середине 50-х годов на смену статическому пришел так называемый динамический метод расчета сооружений на сейсмостойкость. В нашей стране он был предложен И. Л. Корчинским (ЦНИИСК Госстроя СССР), и с 1957 г. вошел в официальные строительные нормы СССР. И хотя с тех пор сами нормы неоднократно пересматривались, метод расчета, претерпев ряд модификаций, в своей сути не изменился. Примерно в это же время динамический метод был включен в строительные коды США.

Динамическому методу расчета (иногда его называют спектральным) присуща важная особенность. Он учитывает различие сейсмических ускорений грунта на разных периодах колебаний. При этом с уменьшением жесткости, т. е. увеличением периодов собственных колебаний сооружений, расчетная сейсмическая нагрузка может снижаться почти в четыре раза. В результате расчетные нагрузки на сооружения, проектируемые для разных сейсмических районов – от 7- до 9-балльной сейсмичности, могут различаться в 12–14 раз за счет разной жесткости зданий (разных периодов собственных колебаний) и сейсмичности (балльности) территории.<sup>1</sup>

Но вот совсем недавно успехи измерительной сейсмологии привели к пониманию того непреложного факта, что «раз на раз не приходится». При землетрясениях могут преобладать как длиннопериодные, так и короткопериодные колебания. Землетрясения в Скопле, Ташкенте, Агадире были короткопериодными, и разрушались преимущественно жесткие здания. Землетрясения в Мехико и Бухаресте содержали в спектре интенсивные длиннопериодные колебания с  $T=2,5$  с и 1,25 с соответственно. Обследования, проведенные в Бухаресте и Мехико, подтвердили сильную корреляцию между сейсмическими спектрами, периодами собственных колебаний зданий и объемами разрушений: здесь массовым разрушениям подверглись более высокие и гибкие здания.

Теперь уже сейсмологам ясно, что спектр сейсмических колебаний определяется двумя группами факторов: с одной стороны, механизмом очага, магнитудой землетрясения, эпицентральной расстоянием, с другой – свойствами грунтов. Из этого следует, в частности, что на одной и той же или близко расположенных площадках могут происходить землетрясения, существенно различающиеся преобладающими периодами колебаний и спектрами.

Как же строительная наука ответила на этот новый вызов природы, сформулированный устами и перьями сейсмологов? Какие дома строить, чтобы избежать резонанса? Жесткие? Гибкие?

1. Кстати, прибывшие в Ленинакан после землетрясения японские эксперты, сравнивая расчетные сейсмические нагрузки на здания в Спитаке и Токио, удивлялись тому, что в Токио эти нагрузки в 4 раза выше. Но ведь они сравнивали несравнимое – 7-балльный (каким он считался до землетрясения) район Спитака и примерно 9-балльный (по шкале MSK) район Токио. Вообще, на всей территории Японии расчетная сейсмичность близка к нашей 9-балльной.

#### АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ

Очевидно, что прогнозируемые сейсмические спектры необходимо учитывать при проектировании. Зачастую, однако, такая информация бывает далеко не полной – известна (из опыта) лишь некоторая область преобладающих периодов. С учетом этого в нашем отделе была разработана спектрально-временная модель сейсмических воздействий и синтезирован соответствующий набор расчетных акселерограмм. Исследования показали, что в условиях неопределенности такого типа оптимальными системами сейсмозащиты являются адаптивные системы, периоды собственных колебаний которых могут меняться в процессе сейсмического воздействия.

Пример таких систем – сооружения с резервными выключающимися элементами. Что это за элементы? Их конструктивные решения очень разнообразны. Например, в зданиях с гибкими нижними этажами или домах на качающихся стойках это могут быть жесткие диафрагмы, которые не несут никакой другой вертикальной нагрузки за исключением собственного веса. Выключением элемента может быть разрушение самой диафрагмы или болтов, заклепок, шпонок, которые соединяют диафрагму с основными элементами здания. Выключающимися элементами могут служить даже перемычки между стенами и диафрагмой. Сейсмические амплитуды колебаний сооружений дополнительно снижаются, если резервные элементы до выключения способны рассеивать энергию либо за счет гистерезиса, либо за счет сухого и (или) вязкого трения.

Эффективность таких систем определяется несколькими факторами.

Один из них – избыточное резервирование. Системы сейсмозащиты с резервными элементами устроены так, что могут находиться в различных состояниях: резервные элементы не выключены, выключены частично или полностью. Пусть вероятность переключения системы в результате выключения первого резервного элемента есть  $P_1$ , второго элемента –  $P_2$ , последнего элемента –  $P_n$ , а  $P_0$  – ве-

роятность разрушения системы с полностью выключенными резервными элементами. Тогда суммарная вероятность разрушения  $P$ , если считать все переключения независимыми событиями, будет определяться произведением всех указанных вероятностей. И поскольку все  $P_i < 1$ , то  $P < 1$  и, естественно,  $P < P_0$ .

Иными словами, наличие резервных элементов заметно снижает вероятность разрушения. При этом спектральные особенности сейсмического движения особой роли не играют.

Другой фактор, напротив, существенно зависит от прогнозируемого набора спектров сейсмических движений и связан с изменением жесткости и, соответственно, периодов собственных колебаний сооружения. Проиллюстрируем это на следующем простом примере.

Пусть на площадке возможны землетрясения двух типов – с короткими преобладающими периодами (например, 0,25 с) и длинными (1,5 с).

Как поведет себя при этом система с выключающимися резервными элементами, которая может находиться в двух состояниях: до выключения резервных элементов ( $T=0,25$  с) и после выключения ( $T=1,5$  с).

**Ситуация первая.** Происходит землетрясение с преобладающими периодами колебаний около 0,25 с, т. е. разными периоду собственных колебаний сооружения. В этом случае начинает развиваться резонанс. Однако при определенных, заранее рассчитанных деформациях, намного меньших предельно допустимых, опасных для сооружений, произойдет выключение (разрушение) жестких резервных элементов. У сооружения упадет жесткость, периоды колебаний увеличатся, и оно «выйдет» из резонансного режима. Для предотвращения чрезмерных горизонтальных перемещений сооружения, теперь уже гибкого, устраиваются специальные упоры-ограничители.

**Ситуация вторая.** Происходит «медленное» землетрясение с  $T=1,5$  с. Сооружение с невыключенными резервными элементами имеет период собственных колебаний 0,25 с, следовательно, резонанса нет и нагрузки относительно малы.

Таким образом, независимо от типа землетрясения в рассматриваемом нами сооружении не реализуется резонансный режим. Нагрузка на такие сооружения с выключающимися элементами в несколько раз ниже, чем на обычные здания с неизменной или мало меняющейся жесткостью.

Разумеется, этот пример носит схематический характер и потому упрощен.

В действительности на одной и той же площадке могут иметь место несколько типов землетрясений, отличающихся друг от друга преобладающими периодами колебаний. Кроме того, деформации конструкций происходят и в неупругой стадии. Эти и другие факторы учитывались в осуществляемой в последние годы широкой программе исследований адаптивных систем. Было, в частности, выявлено влияние нелинейности, нестационарности, диссипации энергии на сейсмическое поведение сооружений, что, в свою очередь, позволило разработать целый класс реальных конструктивных решений для систем с резервными элементами (включающимися и выключающимися).

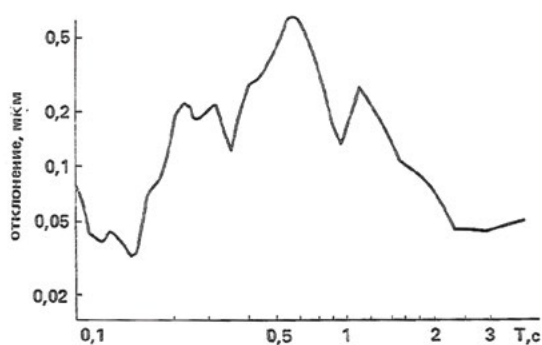
**Таблица 1** — Состояние зданий в Ленинакане после землетрясения 7 декабря 1988 г.

Конструктивное решение		Средние периоды собственных колебаний	Общее количество зданий	Состояние		
Несущие конструкции	Число этажей			разрушено, подлежит сносу	подлежит восстановлению	пригодно к эксплуатации
Крупнопанельные	9	0,35	16	0	16 (100%)	0
Каркасно-панельные	5-9	0,6	65	58 (89%)	1 (2%)	6 (9%)
Комплексные каменные с ж/б включениями	4-5	0,3	78	48 (62%)	2 (2%)	28 (36%)
Каменные и комплексные каменные	1-4	0,1-0,2	768	264 (34%)	184 (42%)	320 (24%)
Всего:			927	370 (40%)	203 (22%)	354 (38%)

**Таблица 2** — Отношение  $A$  фактических нагрузок на здания в северо-западной части Ленинакана к расчетным (при 7 и 8 баллах)

Период собственных колебаний зданий, с	$A_7$	$A_8$
0,15	1,4	2,8
0,3	1,9	3,8
0,6	2,9-5,6*	6-11,2*
1	1,6-3,2*	3,4-6,4*

\* Величина зависит, согласно СНиП, от числа этажей.



**Рисунок 2** — Сглаженные спектры, полученные по регистрации микросейсм японскими экспертами (север Ленинакана)

Более того, они уже реализованы при застройке г. Северобайкальска на западном участке БАМа (расчетная сейсмичность 9 баллов) и в ряде других населенных пунктов.

Системы с резервными элементами обеспечивают повышение надежности (сейсмостойкости) зданий и сниже-

ние расхода материалов, трудоемкости и стоимости строительства. Только в Северобайкальске экономия средств за счет такой системы сейсмозащиты составила 3,5 млн руб.

Это лишь один из ответов строительной науки на вызов природы, которая держит в секрете подробности будущих сейсмических движений, важные с точки зрения выбора наилучших строительных решений. Разумеется, причины разрушений при землетрясениях разнообразны и обусловлены многими факторами: интенсивностью землетрясения, качеством строительства и т. п. Каждый из этих факторов нуждается в отдельном анализе, но это уже выходит за рамки данной статьи.

#### **ЛЕНИНАКАН, 7 ДЕКАБРЯ 1988 г. СПЕКТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ**

По предварительным данным сейсмологов, спектральная картина Спитакского землетрясения была необычно пестрой.

Ускорения, зарегистрированные в Ереване, были весьма высокочастотными. Преобладающие периоды находились, по данным Э. Е. Хачияна, в пределах 0,1–0,2 с.

Напротив, в г. Гукасяне колебания были относительно низкочастотными. Преобладающие периоды одной из их горизонтальных составляющих находились вблизи 0,8 с. Особенно большим разнообразием отличались, по-видимому, спектры в Ленинанкане. Это разнообразие обусловлено специфическими грунтовыми условиями. Под Ленинанканом залегает линза суглинков, перемежающихся с туфами и супесями (ее толщина – несколько сот метров). По расчетам специалистов Института физики Земли АН СССР (В. В. Штейнберга и др.), на различных площадках Ленинанкана преобладающие периоды сильно отличались и составляли 0,3 с; 0,6 с; 0,9 с; 1,5 с.

Измерения, проведенные японскими учеными, подтвердили эти расчеты. Преобладающий период микросейсмических колебаний грунта в северной и центральной частях Ленинанкана по их данным оказался равным 0,6 с. Эта же группа произвела измерения собственных периодов колебаний основных типов зданий.

В Ленинанкане наибольший объем разрушений (89%) приходится на каркасно-панельные здания (см. табл. 1). Единственное 10-этажное здание с ядрами жесткости, возведенное методом подъема перекрытий, обрушилось. Общее у этих зданий одно – периоды их собственных колебаний близки к 0,6 с. Отметим, что в Кировакане здания этого типа не разрушались. Таким образом, значения периодов собственных колебаний наиболее разрушенных зданий, совпадающие по данным советских и японских исследователей, оказываются весьма близки к преобладающим периодам колебаний грунта. Необходимо акцентировать внимание на этом факте. Он вновь подтверждает то, что отчетливо проявилось при землетрясениях в Мехико (1957 г., 1962 г., 1985 г.), Бухаресте (1940 г., 1977 г.) и других местах, – тесную корреляцию между амплитудно-частотным спектром сейсмических ускорений грунта и объемом разрушений.

Эта корреляция убедительно продемонстрирована и в Ленинанкане 7 декабря 1988 г. (см. табл. 2). Более того, прослеживается и некоторая корреляция даже между ускорениями, отвечающими определенным периодам колебаний грунта, и степенью разрушений зданий с такими же периодами собственных колебаний.

Разумеется, эти выводы носят качественный характер, спектры построены приближенно. И все же, корреляция представляется несомненной.

### НЕМНОГО ПОЛЕМИКИ

Несколько иначе расставлены акценты при объяснении причин массовых разрушений в статье Н. В. Шебакина «Стихия и мы» (Коммунист. 1989. № 10. С. 82-92).

Статья написана эмоционально, отражает гражданскую позицию автора, его боль за случившееся как человека и как специалиста, участвовавшего в составлении карты сейсмического районирования. Разделы статьи, касающиеся прогноза землетрясений, сейсмического районирования, социального страхования, написаны особенно сильно и убедительно. И это естественно – пишет специалист, профессионал – игра, как говорится, идет на своей площадке.

Что касается причин разрушений, то здесь автор, как это вольно или невольно делают и многие другие сейс-

мологи, тяготеет к тому, чтобы главной причиной массовой гибели зданий в Ленинанкане назвать низкое качество работ. Споры нет – качество работ и строительных материалов низкое. Оно низкое и в Армении, и в Сибири, и на Дальнем Востоке.

И хотя при сильных землетрясениях две причины разрушений – высокая интенсивность сейсмических колебаний и недостаточная сейсмостойкость построек – так сильно связаны, что часто трудно выделить главную из них, все же совершенно очевидно, что там, где фактическая интенсивность землетрясения близка к указанной на сейсмических картах, никогда не происходило трагедий такого масштаба, как в северной Армении. Независимо от качества строительства.

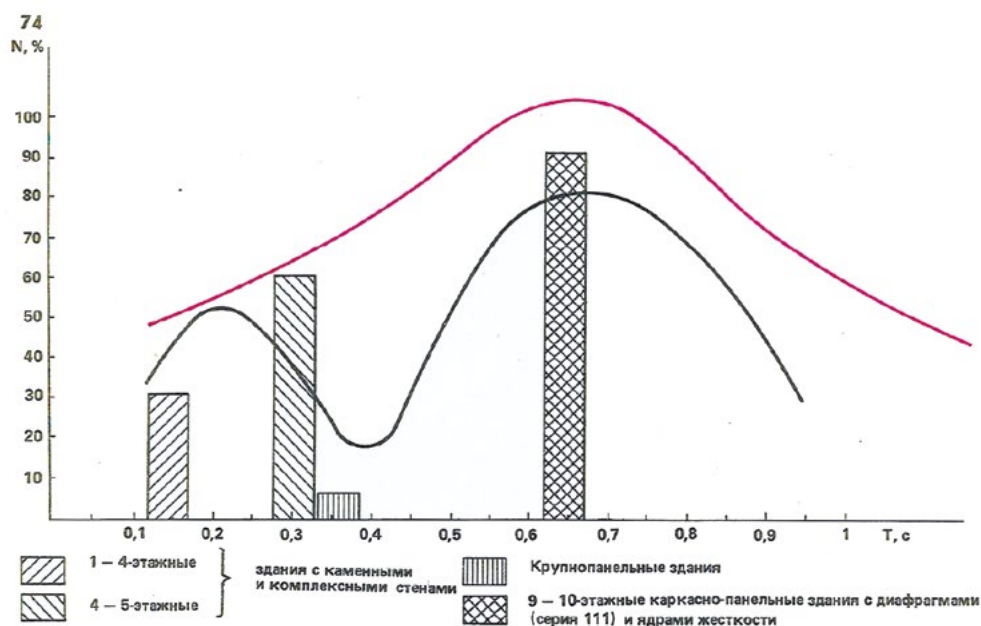
Да и качество строительства, и типы зданий, например, в Ленинанкане и Кировакане, примерно одинаковы. Но в Кировакане интенсивность землетрясения превосходила указанную на сейсмических картах только на 1 балл, а в Ленинанкане – на 1,5–2 балла. Число погибших в Кировакане составило 0,2%, а в Ленинанкане – по неполным данным – 4% (от общего числа жителей). Что же касается Спитака, где фактическая интенсивность превысила расчетную на 2–3 балла, то число потерянных человеческих жизней достигло здесь 40% (см. табл. 3). Заканчивая эту горестную статистику, подчеркнем вновь, что едва ли качество строительства так сильно разнилось в Спитаке, Ленинанкане и Кировакане. Так в чем же главная причина массовых разрушений? Думается, читатель сам теперь ответит на этот вопрос.

В обсуждаемой статье содержатся и другие соображения, которые вызывают потребность обсудить альтернативные точки зрения.

Например, высказано мнение (которое, кстати, разделяют и некоторые другие специалисты), что Ленинанкан «строится почти на старом, опаснейшем месте», что «нынешняя территория Ленинанкана является едва ли не наихудшей с точки зрения сейсмических условий по сравнению со многими другими участками, расположенными по соседству».

Но почему наихудшей? Вот одно из объяснений. Исследования, выполненные В. И. Халтуриным и В. В. Штейнбергом, показали, что «толстая 400-метровая линза плотных глин, залегающая под Ленинанканом, действительно имеет свойства концентрировать в себе и резко усиливать колебания с периодами порядка 1-2 секунд. Ну и что? Автор, вероятно, хочет подчеркнуть, что здания с такими собственными периодами могут резонировать с сейсмическими волнами и разрушаться от чрезмерных динамических нагрузок.

Совершенно верно. Они и разрушились. Большая часть людей погибла в Ленинанкане именно в относительно гибких девятиэтажных каркасных зданиях серии 111, имевших сравнительно данные периоды собственных колебаний. И 10-этажное здание с каркасом и ядром жесткости, которое опрокинулось, тоже имело довольно большой период собственных горизонтальных колебаний. Кстати, качество конструкций этого здания не было особенно низким – скорее его можно считать средним, почти нормальным. Но там же, на той же площадке, превосходно перенесли землетрясение шестнадцать крупнопанельных девятиэтажных



**Рисунок 3** — Зависимость между относительным числом  $N$  разрушенных в Ленинакане зданий и периодами их собственных колебаний. Приведены также конфигурации спектра сейсмической реакции по акселерограмме, полученной в Гукасяне (цветная кривая), и сглаженного спектра сейсмической реакции (по расчетам ИФЗ АН СССР, сделанным после землетрясения) для северной части Ленинакана (черная кривая)

домов. Никто в них не пострадал. Это были более жесткие здания с периодами собственных колебаний 0,3-0,35 с.

Таким образом, землетрясение отчетливо продемонстрировало, какие именно здания следует строить в Ленинакане с учетом специфики его грунтов – специфики, на которую справедливо указывает Н. В. Шебалин. И дело вовсе не в высоте, не в числе этажей, а именно в конструкции. К сожалению, за такую науку заплачено дорогой ценой.

Но, может быть, северо-запад Ленинакана относится к 10-балльной зоне? В таком случае строительными нормами возведение любых сооружений, за исключением малоответственных временных построек, здесь просто запрещено. Обеспечить же сейсмостойкость на 9-балльных площадках строители умеют.

Если же сейсмологи и геологи определяют площадку на северо-западе как 9-балльную, а на юго-востоке как 8-балльную, то проблема выбора должна решаться с учетом целого комплекса факторов: экономических, архитектурных, функциональных и т. п.

Но вернемся к публикации Н. В. Шебалина. Трудно разделить уверенность автора в том, что «большинство погибших зданий в городе обрушились без сильных отклонений в сторону» (это значит, что основные колебания были направлены вертикально), что поскольку для высоких зданий период колебаний приближается к 1 с, то, следовательно, сейсмолог должен прийти к заключению, что «во время землетрясения возникли очень сильные вертикальные колебания с периодом 1-1,5 секунды». В действительности

**Таблица 3** — Последствия Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г.

Город	Общее число жителей до землетрясения, тыс. чел.	Расчетная сейсмичность (до землетрясения), баллы		Фактическая интенсивность землетрясения, баллы	Максимальное превышение фактической интенсивности над расчетной, баллы	Число погибших, тыс. чел.*
		по картам ОСР	с учетом микро-районирования			
Спитак	30	7	7-8	9-10	3	10-12 (40%)
Ленинакан	280	8	7-8	8-9	2	12-15 (4-5%)
Кировакан	220	7	7-8	8	1	0^45 (0,2%)

\* По данным Армянского научно-исследовательского института строительства и архитектуры.



**Рисунок 4** — 16-этажный дом в Ленинанконе, возведенный методом подъема перекрытий. Горизонтальные отклонения верхнего перекрытия после землетрясения – 120 см. Впоследствии дом взорван.

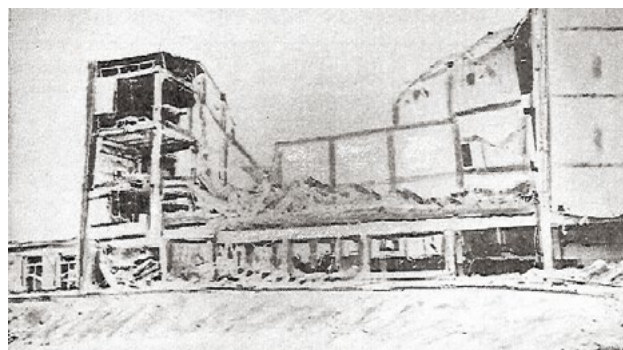
же дело обстоит так. Периоды основного тона собственных колебаний наиболее пострадавших каркасно-панельных 9-этажных зданий составляли: в горизонтальном направлении – около 0,6 с (удлиняясь по мере накопления трещин и других локальных повреждений до 0,9-1,2 с), в вертикальном направлении – по ориентировочным расчетам, 0,1-0,2 с. Что же касается периодов наиболее интенсивных сейсмических ускорений грунта в северо-западной части Ленинанкана, то они составляли, как уже отмечалось, 0,6; 1; 1,5 с. Следовательно, резонанс с этими наиболее интенсивными сейсмическими движениями развивался именно в горизонтальном, а не вертикальном направлении. Это, разумеется, не исключает существенного влияния и вертикальной компоненты сейсмического воздействия, усугубившей разрушения и без того перегруженных собственным весом зданий железобетонных колонн.

Конечно, несмотря на большую проделанную работу по изучению особенностей Спитакского землетрясения, неясного здесь остается еще много. Например, низкочастотные колебания зарегистрированы и в Гукасяне. Чем они вызваны? Грунтовыми условиями или механизмом очага? «Серьезная научная работа по исследованию Спитакского очага и его проявления на поверхности только начинается». И в этом Н. В. Шебалин, безусловно, прав.

#### **ВОПРОСЫ, НА КОТОРЫЕ УЖЕ ЕСТЬ ОТВЕТЫ**

Вернемся к адаптивным системам и зададимся вопросом, который, увы, может быть сформулирован только в условном наклонении: а что если бы адаптивные системы применялись в Ленинанконе? До землетрясения 1988 г. специалистам, во всяком случае, специалистам-строителям, ничего не было известно о специфике ленинанканских сейсмических спектров – они пользовались обычным унифицированным графиком из Строительных норм и правил СССР (СНИП).

Сейчас, зная спектральные особенности ленинанканских грунтов, можно и нужно проводить расчеты с их учетом. Такая работа была проделана в ЦНИИСКе, и ее основные

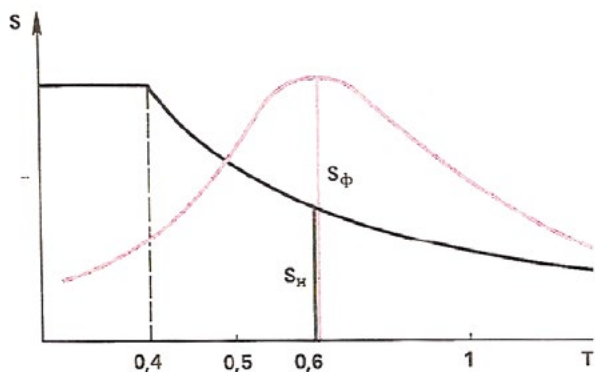


**Рисунок 5** — Север Ленинанкана. Относительно гибкое каркасное здание



**Рисунок 6** — 4-этажный дом с комплексными стенами





**Рисунок 7** – Приведенные спектры сейсмической реакции: черная кривая взята из норм, которыми руководствовались при проектировании зданий в Ленинакане, цветная получена после землетрясения на основании данных ИФЗ АН СССР и группы японских экспертов. Видно, что при  $T=0,6$  с фактическая реакция  $S_{\phi}$  примерно в 2 раза превышает нормативную. Чтобы оценить превышение фактической горизонтальной сейсмической нагрузки над проектной, нужно умножить  $S_{\phi}/S_{н}$  на отношение максимальных фактических и нормативных ускорений [для Ленинакана это 2-4). Это означает, что для зданий с периодами собственных колебаний около 0,6 с фактическая нагрузка могла превышать расчетную в 4-8 раз.

результаты проще всего продемонстрировать на примере.

Пусть запроектировано сооружение с резервными выключающимися элементами, которое может находиться в двух состояниях: до выключения элементов период собственных колебаний сооружений  $T=0,25$  с, после выключения – 1,5 с. Допустим, что прочность выключающихся элементов подобрана так, что при землетрясениях с высокочастотными спектрами они выключаются, а при землетрясениях с низкочастотными спектрами – не выключаются. Оказывается, что при любом из землетрясений, которые могут произойти в Ленинакане, нагрузка на такую самонастраивающуюся систему может быть по крайней мере вдвое ниже, чем на обычное сооружение с  $T=0,25$  с, а перемещения в несколько раз меньше, чем у сооружения

с  $T=1,5$  с. Таким образом, и инерционные силы, и перемещения в системах с перестраивающимися динамическими характеристиками ниже, чем в обычных.

Конечно, эти рассуждения довольно схематичны и призваны лишь проиллюстрировать концепцию проектирования и принцип управления адаптивным сооружением. Из них, в частности, следует, что при использовании адаптивных систем с выключающимися элементами расчетную сейсмическую нагрузку на сооружения в Ленинакане можно существенно снизить, а сейсмостойкость сооружений повысить.

Теперь можно попытаться ответить на вопросы, поставленные в начале статьи.

Могут ли строители разработать проект сейсмостойкого здания в отсутствие прогноза места, времени, интенсивности и других характеристик землетрясения? Разумеется, ответ на этот вопрос будет отрицательным.

К счастью, некоторые сведения всегда имеются. Выше был приведен пример, когда неполнота информации заключается в том, что неизвестен спектр будущего землетрясения, и обсуждена проблема оптимально проектирования в такой ситуации. Встречаются, конечно, и другие виды сейсмологических неопределенностей.

Хотя строительная наука разрабатывает свои методы, помогающие обойти эти неопределенности, необходимо отчетливо понимать – чем их больше, тем выше цена сейсмостойкости сооружения. Повышение расчетной сейсмической нагрузки вдвое, т. е. на 1 балл, повышает стоимость сооружений на 2-6 %.

В заключение нужно подчеркнуть, что методы и результаты сейсмостойкого строительства во многом связаны с уровнем и результатами сейсмологических исследований, в частности инженерной сейсмологии. Сейсмологи и строители должны работать по общим программам. Масштабы подобных исследований как у строителей, так и у сейсмологов ныне не отвечают огромным масштабам строительства в сейсмоопасных районах страны – их необходимо радикально расширить.

**AIZENBERG YA.**

## THE SCIENCE OF CONSTRUCTION VS. NATURAL CALAMITIES

### Abstract

*How can dangerous resonance be avoided in building designed for the regions where there is no complete information of seismic conditions? One of the possible*

*ways is to construct self-adjusting systems of seismic stability.*

**Keywords:** *seismology, construction, resonance, safety, earthquake, experimental studies.*