



## **К ВОПРОСУ О ПЕРЕСЧЕТЕ БАЛЛЬНОСТИ В УСКОРЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА**

**КУРБАЦКИЙ Е.Н.**

*Профессор кафедры мостов и тоннелей Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МИИТ), д. т. н., г. Москва.  
dynamic.miit@gmail.com*

**КОСАУРОВ А.П.**

*Аспирант кафедры мостов и тоннелей Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МИИТ), г. Москва, artkp14@mail.ru*

**Ключевые слова:** сейсмическая интенсивность; балльность; приращения балльности; ускорения колебаний; нормативные документы; эталонный грунт; формула Медведева; финитные функции; спектры Фурье; спектры отклика.

**Аннотация:** в России исходная информация для расчета сооружений на сейсмические воздействия традиционно задается в баллах. В статье показано, что применение формулы Медведева в широкой области частот для пересчета балльности в ускорения грунта только на основании отношений сейсмических (акустических) жесткостей является ошибочным и может привести к опасным последствиям. Эта формула не учитывает ни резонансные явления, ни толщину поверхностных слоев, ни демпфирующие свойства грунта. В качестве альтернативы приведена методика оценки сейсмических воздействий на поверхности слоя грунта, расположенного на упругом полупространстве, учитывающая

резонансные явления, рассеивание энергии волнами, распространяющимися в полупространстве, и гистерезисное демпфирование колебаний в грунте. Статья публикуется в порядке дискуссии.

## ON THE ISSUE OF RECALCULATING SEISMIC INTENSITY POINTS INTO GROUND-MOTION ACCELERATIONS

**KURBATSKY E.N.**

*Professor of the Department of Bridges and Tunnels of the Moscow State University of Railway Engineering, DSc (doctor of science in Technics), Moscow, dynamic.miit@gmail.com*

**KOSAUROV A.P.**

*Postgraduate student of the Department of Bridges and Tunnels of the Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, artkp14@mail.ru*

**Key words:** seismic intensity; seismic intensity points; increments of seismic intensity points; accelerations of vibrations; normative documents; reference soil; Medvedev's formula; finite functions; Fourier spectra; response spectra.

**Abstract:** in Russia initial data for calculation of engineering structures taking into consideration seismic impacts are traditionally given in seismic intensity points. The paper shows, that using Medvedev's formula in a wide frequency range for recalculating seismic intensity points into soil accelerations only on the basis of seismic (acoustic) impedances is wrong and can result in dangerous consequences. This formula does not take into account neither resonance phenomena, nor surface layer thicknesses, nor damping soil properties. The authors present an alternative technique of estimating seismic effects on the surface of a soil layer on an elastic half-space, which takes into consideration resonance phenomena, energy dissipation by waves in the half-space, and hysteretic damping of vibrations in the soil. The article is published as a basis for discussion.

### Введение

В России для оценки сейсмических воздействий на сооружения используются карты общего сейсмического районирования (ОСР), в которых интенсивность землетрясений  $I$  (балльность) оценивается в баллах. К настоящему времени для территории РФ разработаны актуализированные карты ОСР-2016 (А, В, С), предназначенные для замены ОСР-97 (А, В, С). Основные принципы их построения в основном остались прежними, однако изменилась его методология и использовалось современное программно-математическое обеспечение.

При этом при проектировании наземных и подземных сооружений такое понятие, как балльность, непосредственно ни в каких расчетах никогда и нигде не использовалось. При расчетах подземных сооружений применяются пиковые значения скоростей и перемещений точек грунта при землетрясениях, а для наземных -- пиковые величины ускорений, скоростей, перемещений точек грунта и продолжительность землетрясений. Кроме того, используются акселерограммы колебаний грунта, совместимые с расчетными спектрами ответов.

Еще в 2012 году в работе [6] отмечалось, что в России ускорения смещений грунта при землетрясениях определяются по картам ОСР путем пересчета балльности, соответствующей актуализированной макросейсмической шкале, а не на основе инструментальных измерений, как это принято во многих странах мира. Приведем цитату

из статьи [6]: «И хотя в отечественной строительной практике до сих пор используется простой пересчет баллов в ускорения по шкале МСК-64, необходимо отметить, что такой пересчет не учитывает спектральный состав сейсмического воздействия и в силу этого должен очень осторожно применяться для инженерных расчетов без должного обоснования».

Отметим, что и в 2016 году и, похоже, в ближайшие несколько лет проектировщикам придется пользоваться такими плохо обоснованными перерасчетами. Для доказательства приведем выдержку из письма В.И. Уломова председателю Научного совета РАН по проблемам сейсмологии Г.А. Соболеву<sup>1</sup>: «На основе карт ОСР-2016 планируется разработать и создать карты спектров реакций на сейсмические воздействия, представленные в ускорениях, которые более профессионально по сравнению с баллами могут использоваться проектировщиками для обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений. Такие карты широко распространены в США и в других странах, где карты в баллах уже не составляются».

Возникает вопрос: что же делать сейчас? Есть смысл оценить, какие ошибки допускаются при оценке ускорений при переходе от макросейсмической шкалы к сейсмическим параметрам.

### **Что такое средний и эталонный грунт?**

При проектировании сооружений необходимо перейти от балльности к ускорениям и при этом учесть грунтовые условия строительной площадки. При разработке карт ОСР-97 для оценки сейсмической интенсивности в баллах использовались так называемые средние грунты, под которыми составители карт понимали грунты второй категории. Согласно СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» (актуализированной редакции СНиП II-7-81\*) сейсмическая жесткость грунтов второй категории изменяется в широких пределах -- от 350 до 1 500 (г/см<sup>3</sup>)·(м/с). Надо полагать, что именно в таком виде понятие «средние грунты» использовалось составителями карт ОСР [6, 7]. Если при определении сейсмичности района (балльности) под средними понимаются грунты с сейсмической жесткостью 350---1 500 (г/см<sup>3</sup>)·(м/с), то на каком основании можно уточнять сейсмичность, выбрав из них какой-то особенный? Такое широкое понимание среднего грунта приводит к «произволу» и неконтролируемым ошибкам при определении исходной сейсмичности по картам ОСР. Чтобы для уточнения сейсмичности площадки можно было использовать эталонный грунт, необходимо, чтобы карты ОСР были разработаны именно для него.

Во многих случаях удивляет отсутствие элементарной логики при микрорайонировании. Например, при выполнении микрорайонирования по картам ОСР определяется сейсмичность района. Затем находятся параметры некоего эталонного грунта и без какой-либо дополнительной информации уточняется сейсмичность строительной площадки относительно него.

Уже давно предлагалось отказаться от применения максимального ускорения на среднем грунте (категории II) в качестве основного амплитудного параметра колебаний и использовать пиковое ускорение на скальном грунте (категории I).

В СП 14.13330.2014 появился так называемый референтный (эталонный) грунт с неизвестно откуда взявшейся средней сейсмической жесткостью 655 (г/см<sup>3</sup>)·(м/с), с использованием которой должен производиться перерасчет интенсивности с учетом жесткости грунта строительной площадки. На вопрос автора о том, использовался ли указанный референтный грунт при оценке сейсмичности районов, никто из разработчиков

---

<sup>1</sup> Автор полагает, что это письмо не содержит секретной информации, поскольку оно было распространено среди участников заседания Научного совета РАН по проблемам сейсмологии 22 января 2016 года.

карт ОСР не дал положительного ответа. Не ясно, на каком основании он стал эталонным и почему именно относительно него необходимо определять приращение балльности.

«Выбор расчетной жесткости для эталонного среднего грунта по сейсмическим свойствам по экономическим соображениям, а также традиционным для сейсмического районирования представлениям о среднем грунте как о типичном грунте селитебных территорий», как это представлено в работе [9] и рекомендациях [10], вызывает недоумение и беспокойство. При чем тут карты ОСР? Эталонный грунт с такими же свойствами принят, например, и для строительной площадки моста через Керченский пролив. Возникает вопрос: на каком основании? Ведь грунты там совершенно не похожи на грунты селитебных территорий.

Никогда грунт с подобными характеристиками при разработке карт ОСР не использовался. Но даже если допустить, что сейсмичность определялась для грунтов с эталонной жесткостью  $655 \text{ (г/см}^3\text{)} \cdot \text{(м/с)}$ , методика пересчета балльности в ускорения приводит к большим ошибкам.

Таким образом, если не обращать внимания на большое количество ошибок в СП 14.13330 и допустить определение понятия «средний грунт» на основе таблицы 1 данного документа, к этой категории относятся очень разнообразные грунты<sup>2</sup>, что исключает возможность ее практического использования для целей общего сейсмического районирования.

### О методе сейсмических жесткостей

В начале второй половины прошлого века С.В. Медведевым была разработана методика сейсмического микрорайонирования [4], которая сохранилась в нормативных технических документах РФ настоящего времени. В соответствии с этой методикой параметры сейсмических воздействий связываются со свойствами грунта. Вводятся два понятия -- категория грунта и балльность (или приращение балльности). Возникает необходимость установить соответствие между ними.

В актуализированном документе СП 14.13330.2014 приводится следующая формула для определения приращения интенсивности  $\Delta I$  в баллах на основе метода сейсмических жесткостей:

$$\Delta I = 1,67 [\lg 655 - \lg(\rho V_S)], \quad (1)$$

где  $\rho$  -- плотность грунта,  $\text{г/см}^3$ ;  $V_S$  -- скорость распространения поперечных сейсмических волн в грунте,  $\text{м/с}$ ;  $\rho V_S$  -- сейсмическая жесткость грунта при распространении поперечных волн,  $(\text{г/см}^3) \cdot \text{(м/с)}$ .

Причем выражение (1) предлагается использовать без оговорок практически во всех случаях. Оно является частным случаем формулы С.В. Медведева:

$$\Delta I = 1,67 [\lg(\rho_3 V_{P_3}) - \lg(\rho_u V_{P_u})], \quad (2)$$

где  $\rho_3$ ,  $\rho_u$  -- плотность эталонного и исследуемого грунта соответственно,  $\text{г/см}^3$ ;  $V_{P_3}$ ,  $V_{P_u}$  -- скорость распространения продольных сейсмических волн в эталонном и исследуемом грунте соответственно;  $\rho_3 V_{P_3}$ ;  $\rho_u V_{P_u}$  -- сейсмическая жесткость грунта при распространении продольных волн в эталонном и исследуемом грунте соответственно,  $(\text{г/см}^3) \cdot \text{(м/с)}$ . **Авторам: при выводе формулы (19), которая сравнивается и почти совпадает с формулой Медведева (2), речь идет о продольных волнах, а в формуле (1) из СП 14.13330.2014 -- о поперечных. Почему тогда указано, что формула (1) -- частный случай формулы (2)? Надо как-то это связать между собой и кратко пояснить или внести соответствующие исправления в формулы и экспликации к ним.**

<sup>2</sup> В нормативных технических документах, к сожалению, отсутствуют точные и непротиворечивые определения понятия «средний грунт».

Уравнение (2), как отмечается в СП 14.13330.2014, было получено методом сейсмических жесткостей, хотя не упоминается, в чем он заключается. Не ясно, при каких условиях и ограничениях можно применять эту формулу. Возникает вопрос: почему почти за полувековой период ее использования в ответственных нормативных документах у сейсмологов не появилось желания проверить соответствие между реакцией грунтов при сильных землетрясениях и прогнозной интенсивностью. Трудно себе представить, как обосновать такую формулу «эмпирическими данными, указывающими на связь сейсмической жесткости и степени разрушения зданий при землетрясениях» [9]. Как можно по трещинам и разрушениям зданий определить коэффициент перед разностью логарифмов с точностью до третьего знака?

В другой работе [2, стр.22] приводится еще более «интересное» объяснение происхождения указанного коэффициента в формуле Медведева: «Коэффициент пропорциональности  $k = 1,67$  был получен как среднее арифметическое из нескольких частных определений. Никакого физического обоснования полученного коэффициента при этом не было дано. Лишь впоследствии в диссертационной работе И.А. Ершова появились соображения физического плана, поясняющие вывод полученного коэффициента». Добавим от себя, что в основу вывода И.А. Ершова было положено ошибочное предположение о равенстве потоков энергии в двух точках среды с разными акустическими жесткостями.

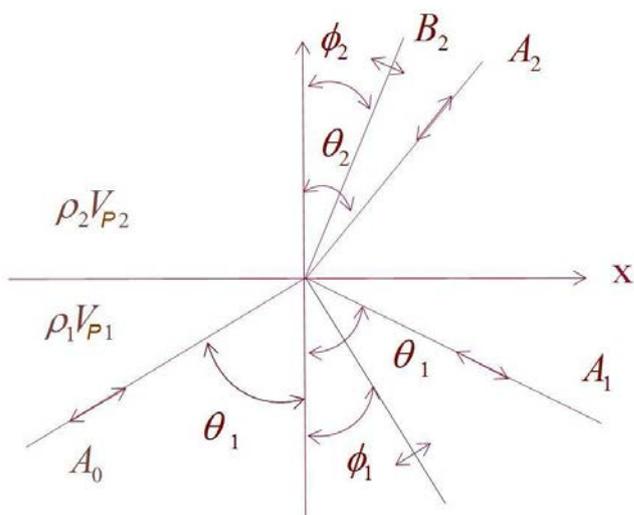
Есть смысл доказать формулу С.В. Медведева с целью уточнения области ее применимости. При этом напрашивается мысль о возможности использования разностей логарифмов акустических жесткостей, которые давно и успешно применяются в сейсморазведке.

### **Приращения логарифмов акустических жесткостей**

В сейсмологии (в частности, в сейсморазведке) давно известна и широко используется формула, определяющая зависимость между параметрами волн, проходящих через границу раздела грунтов с разными свойствами. Формулы, описывающие зависимости между параметрами падающих, преломленных и отраженных волн, были получены еще в 1919 году и носят название уравнений Цёппритца<sup>3</sup> [13]. При падении волн на границу раздела сред в общем случае порождаются как продольные (Р-), так и поперечные (S-) отраженные и преломленные волны (рис. 1). Углы отражения и преломления определяются скоростями их распространения в соответствующих средах. Амплитуды преломленных и отраженных волн зависят от произведений плотностей сред и скоростей распространения волн (то есть от акустических жесткостей).

---

<sup>3</sup> Уравнения Цёппритца (Zoeppritz) определяют изменения амплитуд сейсмических волн на границах слоев с различными сейсмическими свойствами.



**Рис. 1.** Волны, возникающие на границе раздела сред при падении на нее продольных волн. Буквенные обозначения: X -- граница раздела сред;  $A_0$  -- амплитуда падающей продольной волны;  $A_1$  -- амплитуда отраженной продольной волны;  $A_2$  -- амплитуда преломленной продольной волны;  $B_1$  -- амплитуда отраженной поперечной волны;  $B_2$  -- амплитуда преломленной поперечной волны;  $\rho_1, \rho_2$  -- плотности грунта до и после границы раздела сред соответственно;  $V_{P1}, V_{P2}$  -- скорости распространения продольных сейсмических волн в грунте до и после границы раздела соответственно;  $\rho_1 V_{P1}, \rho_2 V_{P2}$  -- сейсмическая жесткость грунта до и после границы раздела соответственно при распространении в грунта продольных волн;  $\phi_1$  -- угол отражения поперечной волны;  $\phi_2$  -- угол преломления поперечной волны;  $\theta_1$  -- угол падения продольной волны;  $\theta_2$  -- угол преломления продольной волны

Не будем приводить уравнения, определяющие амплитуды преломленных и отраженных волн при произвольном угле падения сейсмической волны на границу раздела. Их можно найти в книге известных геофизиков Р.Е. Шериффа (R.E. Sheriff) и Л.П. Гердarta (L.P. Geldart) «Сейсморазведка» [8]. Приведем лишь выражения для случая нормального падения продольной волны на границу раздела, которые в дальнейшем будем использовать при выводе формулы С.В. Медведева:

для отраженной волны:

$$R = \frac{A_1}{A_0} = \frac{\rho_2 V_{P2} - \rho_1 V_{P1}}{\rho_2 V_{P2} + \rho_1 V_{P1}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad (3)$$

для преломленной волны:

$$T = \frac{A_2}{A_0} = \frac{2\rho_1 V_{P1}}{\rho_2 V_{P2} + \rho_1 V_{P1}} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (4)$$

где  $R$  -- коэффициент отражения, безразм.;  $T$  -- коэффициент преломления (прохождения), безразм.;  $A_0$  -- амплитуда падающей продольной волны, м;  $A_1$  -- амплитуда отраженной продольной волны, м;  $A_2$  -- амплитуда преломленной продольной волны, м;  $\rho_1, \rho_2$  -- плотность грунта до и после границы раздела сред соответственно, г/см<sup>3</sup>;  $V_{P1}, V_{P2}$  -- скорость распространения продольной сейсмической волны в грунте до и после границы раздела соответственно, м/с;  $\rho_1 V_{P1} = Z_1, \rho_2 V_{P2} = Z_2$  -- сейсмическая жесткость (импеданс) грунта соответственно до и после границы раздела при распространении продольных волн, (г/см<sup>3</sup>)·(м/с).

Зависимости коэффициентов отражения и преломления от углов падения при малых величинах последних (примерно до 20°) меняются медленно. Поэтому результаты, полученные для нормального падения волн, имеют широкую область применения.

При определении амплитуд отраженных волн в сейсморазведке (при сейсмическом каротаже) используется формула приращения логарифма акустических жесткостей [8].

При выводе формулы предполагается, что для большинства соседних слоев грунта различия в значениях как плотности, так и скорости распространения волн малы. Поэтому принимается, что  $Z_1 \approx Z_2 = Z$ . Допущение, что  $Z_2 + Z_1 = 2Z$ , не вносит больших искажений в конечный результат. Поэтому отношение разностей акустических жесткостей к сумме заменяется выражением (непрерывной функцией)  $\Delta Z / (2Z)$ . Отношение приращения функции к самой функции представляет собой приращение ее натурального логарифма. Таким образом, получаем:

$$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \approx \frac{\Delta Z}{2Z} = \frac{1}{2} \Delta(\ln Z) = \frac{\lg Z_2 - \lg Z_1}{2 \lg e}, \quad (5)$$

где  $\Delta Z = Z_2 - Z_1$  -- разность (приращение) акустических жесткостей;  $e$  -- основание натурального логарифма (число «е»).

Применимость формул (3--5) была проверена при многочисленных экспериментальных исследованиях, выполненных для определения расположения нефтяных и газоносных пластов. Именно при таких условиях можно использовать логарифмы акустических жесткостей и приращения этих логарифмов.

### Определение коэффициента, учитывающего изменения интенсивности сейсмических воздействий при замене эталонного грунта на грунт строительной площадки

Волны, генерируемые в источниках землетрясений, излучаются во всех направлениях. При распространении через слои грунта они рассеиваются, отражаются, преломляются и трансформируются. В соответствии с законом преломления Снеллиуса траектории волн становятся почти вертикальными, когда они достигают поверхности земли. Поэтому при оценке параметров волн вблизи поверхности часто рассматривается их нормальное падение.

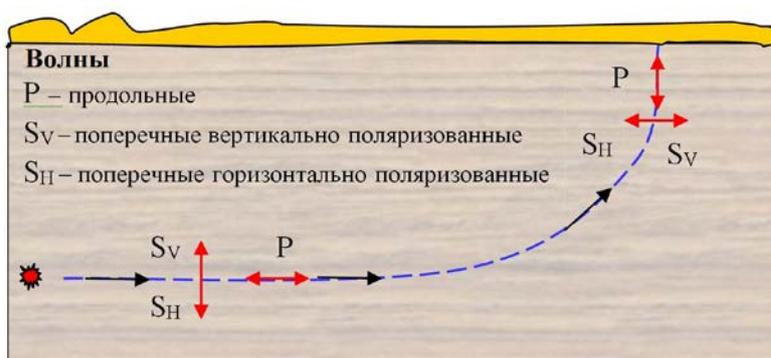
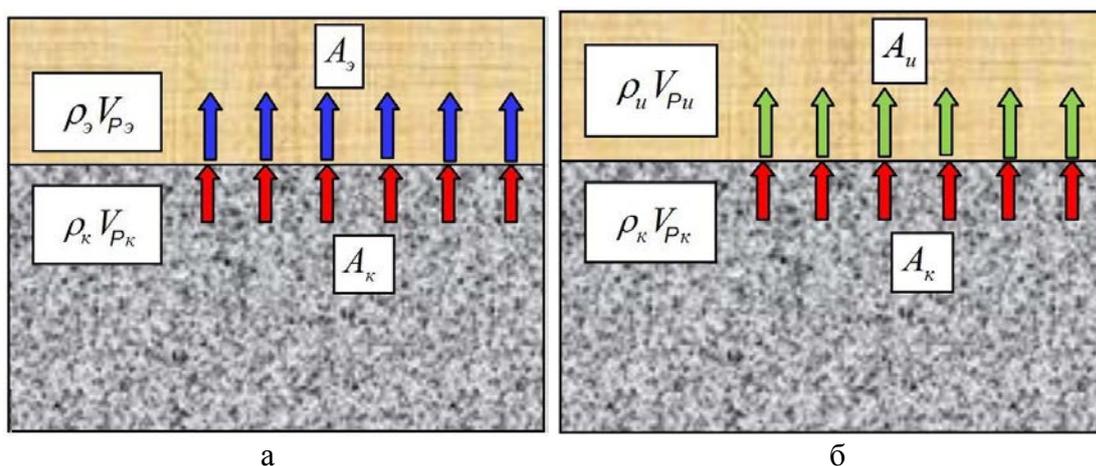


Рис. 2. Схема распространения сейсмических волн от источника

Допустим, что для определения интенсивности сейсмических воздействий при построении карт ОСР использовался эталонный грунт с сейсмической жесткостью  $\rho_э V_{Pэ}$ , а грунты строительной площадки характеризуются сейсмической жесткостью  $\rho_u V_{Pu}$  (где  $\rho_э$ ,  $\rho_u$  -- плотность эталонного и исследуемого грунта соответственно;  $V_{Pэ}$ ,  $V_{Pu}$  -- скорость распространения продольной сейсмической волны в эталонном и исследуемом грунте соответственно;  $\rho_э V_{Pэ}$ ,  $\rho_u V_{Pu}$  -- сейсмическая жесткость эталонного и исследуемого грунта соответственно). Тогда для учета местных инженерно-геологических и геоморфологических условий необходимо учесть поправочный коэффициент.

Рассмотрим две расчетные схемы для случаев, когда сейсмические волны падают на границу раздела сред (рис. 3):

- 1) на коренной породе находится слой грунта, характеристики которого соответствуют эталонному, то есть его сейсмическая жесткость равна  $\rho_э V_{Pэ}$ ;
- 2) на коренной породе находится слой грунта, характеристики которого соответствуют грунту строительной площадки, то есть его сейсмическая жесткость равна  $\rho_u V_{Pu}$ .



**Рис. 3.** Расчетные схемы для случаев, когда сейсмические волны падают на границу раздела сред, преломляются и отражаются от свободной границы: а -- слой эталонного грунта на коренной породе; б -- слой исследуемого грунта на коренной породе. Буквенные обозначения:  $\rho_к$ ,  $\rho_э$ ,  $\rho_u$  -- плотность коренной породы, эталонного и исследуемого грунта соответственно;  $V_{Pк}$ ,  $V_{Pэ}$ ,  $V_{Pu}$  -- скорость распространения продольных сейсмических волн в коренной породе, эталонном и исследуемом грунте соответственно;  $\rho_к V_{Pк}$ ,  $\rho_э V_{Pэ}$ ,  $\rho_u V_{Pu}$  -- сейсмическая жесткость соответственно коренной породы, эталонного и исследуемого грунта при распространении продольных волн;  $A_к$ ,  $A_э$ ,  $A_u$  -- амплитуда ускорения продольной сейсмической волны в коренной породе, эталонном и исследуемом грунте соответственно

Если не учитывать резонансные явления в поверхностных слоях, то можно получить простые выражения для поправочных коэффициентов на динамические свойства этих слоев.

Поправочный коэффициент на динамические свойства расчетной грунтовой толщи (ее сейсмическую жесткость), можно определить, используя уравнения Цёппритца [8], описывающие распространение волн через границы раздела сред. При нормальном падении волн на границу раздела эти уравнения принимают следующий вид:

$$T_э = \frac{A_э}{A_к} \cdot \frac{2\rho_к V_{Pк}}{\rho_э V_{Pэ} + \rho_к V_{Pк}}; \quad (6)$$

$$T_u = \frac{A_u}{A_к} \cdot \frac{2\rho_к V_{Pк}}{\rho_к V_{Pк} + \rho_u V_{Pu}}, \quad (7)$$

где  $T_э$ ,  $T_u$  -- коэффициент преломления волны при ее прохождении из коренной породы в эталонный и исследуемый грунт соответственно;  $A_к$ ,  $A_э$ ,  $A_u$  -- амплитуда ускорения продольной сейсмической волны в коренной породе, эталонном и исследуемом грунте соответственно;  $\rho_к$ ,  $\rho_э$ ,  $\rho_u$  -- плотность коренной породы, эталонного и исследуемого грунта соответственно;  $V_{Pк}$ ,  $V_{Pэ}$ ,  $V_{Pu}$  -- скорость продольной сейсмической волны в коренной породе, эталонном и исследуемом грунте соответственно;  $\rho_к V_{Pк}$ ,  $\rho_э V_{Pэ}$ ,  $\rho_u V_{Pu}$  -- сейсмическая жесткость соответственно коренной породы, эталонного и исследуемого грунта при распространении продольных волн.

Следует отметить, что при нормальном падении волн на границу раздела и горизонтальном расположении верхнего слоя, вид уравнений для продольных и поперечных волн одинаков. Поэтому для получения уравнений для поперечных волн необходимо в уравнениях поменять скорости распространения продольных волн на скорости распространения поперечных.

Учитывая удвоение кинематических параметров волн на свободной поверхности, из уравнения (6) можно получить зависимость амплитуды ускорения волны в эталонном слое ( $A_э$ ) от амплитуды ускорения волны в коренной породе ( $A_к$ ), и наоборот:

$$A_э = \frac{4\rho_к V_{Pк}}{\rho_к V_{Pк} + \rho_э V_{Pэ}} A_к ; \quad (8)$$

$$A_к = \frac{\rho_к V_{Pк} + \rho_э V_{Pэ}}{4\rho_к V_{Pк}} A_э . \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в уравнение (7) и учтя удвоение кинематических параметров волн на свободной поверхности, получим формулу для амплитуды в исследуемом грунте:

$$A_u = \frac{4\rho_к V_{Pк}}{\rho_к V_{Pк} + \rho_u V_{Pu}} \cdot \frac{\rho_к V_{Pк} + \rho_э V_{Pэ}}{4\rho_к V_{Pк}} \cdot A_э = \frac{\rho_к V_{Pк} + \rho_э V_{Pэ}}{\rho_к V_{Pк} + \rho_u V_{Pu}} \cdot A_э . \quad (10)$$

Тогда для определения поправочного коэффициента  $K$ , учитывающего усиление (ослабление) кинематических параметров сейсмических волн для разных категорий грунтов, получим:

$$K = \frac{A_э}{A_u} = \frac{\rho_к V_{Pк} + \rho_u V_{Pu}}{\rho_к V_{Pк} + \rho_э V_{Pэ}} . \quad (11)$$

Отметим, что для вывода формулы (11) не использовались ни разложения в ряды, ни приближенные представления дифференциалов функций. Она справедлива для любых соотношений акустических жесткостей грунтов. Поэтому ее можно считать точной, если не учитывать резонансные явления.

Для любых, даже самых слабых, грунтов коэффициент  $K$  не превышает 2 (то есть  $K \rightarrow 2$  при  $V_{Pu} \rho_u \rightarrow 0$ ). При выходе коренных пород на поверхность  $V_{Pu} \rho_u = V_{Pэ} \rho_э$  и  $K = 1$ .

### Вывод формулы для приращения балльности (формулы С.В. Медведева)

Предварительно отметим, что при замене эталонного грунта исследуемым в формуле С.В. Медведева не учитываются резонансные явления, так как в нее не входят ни мощности слоев, ни частоты колебаний.

Для вывода этой формулы, определяющей приращения балльности при переходе от эталонного грунта к исследуемому, для учета инженерно-геологических условий представляется естественным и логичным использовать расчетные схемы, показанные на рис. 3. Представим наиболее простой вывод.

При замене эталонного грунта исследуемым отношения амплитуд перемещений, скоростей или ускорений волн можно представить в виде формулы Цёппритца:

$$\frac{A_u}{A_э} = \frac{2\rho_э V_{Pэ}}{\rho_u V_{Pu} + \rho_э V_{Pэ}} . \quad (12)$$

Преобразуем ее следующим образом:

$$2^{\Delta I} = \frac{A_u}{A_s} = \frac{\rho_s V_{P_s} - \rho_u V_{P_u}}{\rho_s V_{P_s} + \rho_u V_{P_u}}; \quad (13)$$

$$2^{\Delta I} = 1 + \Delta I \ln 2 + \frac{(\Delta I \ln 2)^2}{2!} + \dots; \quad (14)$$

$$\frac{2\rho_s V_{P_s}}{\rho_s V_{P_s} + \rho_u V_{P_u}} = \frac{\rho_s V_{P_s} - \rho_u V_{P_u}}{\rho_s V_{P_s} + \rho_u V_{P_u}} + 1 = \frac{1}{2} [\ln(\rho_s V_{P_s}) - \ln(\rho_u V_{P_u})] + 1, \quad (15)$$

где  $\Delta I$  -- приращение балльности.

Переходя от натуральных логарифмов к десятичным, получим:

$$\frac{\rho_s V_{P_s} - \rho_u V_{P_u}}{\rho_s V_{P_s} + \rho_u V_{P_u}} + 1 \approx \frac{1}{2} [\ln(\rho_s V_{P_s}) - \ln(\rho_u V_{P_u})] = \frac{1}{2 \cdot \lg e} [\lg(\rho_s V_{P_s}) - \lg(\rho_u V_{P_u})]. \quad (16)$$

Отметим, что при замене отношения разности жесткостей к их сумме разностью логарифмов принимается, что разность  $(\rho_s V_{P_s} - \rho_u V_{P_u})$  мала и, соответственно,  $\rho_s V_{P_s} \approx \rho_u V_{P_u}$ .

Удерживая в разложении показательной функции (14) первые два члена ряда и учитывая приближенное равенство (16), получим:

$$1 + \Delta I \cdot \ln 2 = \frac{1}{2 \cdot \lg e} [\lg(\rho_s V_{P_s}) - \lg(\rho_u V_{P_u})] + 1, \quad (17)$$

или

$$\Delta I = \frac{1}{2 \cdot \ln 2 \cdot \lg e} [\lg(\rho_s V_{P_s}) - \lg(\rho_u V_{P_u})]; \quad (18)$$

$$\Delta I = 1,66 [\lg(\rho_s V_{P_s}) - \lg(\rho_u V_{P_u})]. \quad (19)$$

Отметим, что формула С.В. Медведева (2) с точностью до третьей значащей цифры совпадает с преобразованной приближенной формулой Цёппритца (19) (если  $\ln 2$  вычислять с точностью не до трех, а до двух цифр после запятой, то указанные выражения полностью совпадут). Можно предположить, что С.В. Медведеву были известны формулы Цёппритца и их представление через приращения логарифмов сейсмических жесткостей.

Уравнение Цёппритца определяет отношение параметров волн, распространяющихся через границу раздела сред, а уравнение С.В. Медведева определяет то же самое в баллах. Формула Медведева является приближенным выражением формулы Цёппритца, так как следует из нее при условии, что квадратом приращения балльности  $\Delta I$  можно пренебречь и что разность сейсмических жесткостей грунтов мала.

Причем уравнение С.В. Медведева справедливо только при малых (меньше единицы) приращениях балльности. При распространении волны через границу раздела сред при уменьшении жесткости второй среды амплитуда преломленной волны приближается по величине к удвоенной амплитуде падающей волны, но не достигает этого значения, так как полное удвоение проявляется только на свободной границе.

Поэтому не имеют физического смысла определения категорий грунтов, в которых используются, например, выражения:

$$2 = 1,67 [\lg(\rho_1 V_{P1}) - \lg(\rho_2 V_{P2})]; \quad (20)$$

$$3 = 1,67 [\lg(\rho_1 V_{P1}) - \lg(\rho_2 V_{P2})]. \quad (21)$$

Почему же в природных условиях амплитуды ускорения колебаний в слабых грунтах возрастают более чем в два раза? В этом случае надо рассматривать более сложные явления, учитывающие резонансы. Простой заменой акустической жесткости одного грунта на акустическую жесткость другого грунта такое явление не описать.

### **Ошибочные положения СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» по определению исходной сейсмичности с использованием приращения балльности**

1. Формула Медведева (2) является приближенным представлением уравнения Цёппритца, поэтому определение категорий грунтов по приращениям балльности в предположении, что они равны 1 баллу или даже 2 или 3 баллам, ошибочно.
2. Манипуляции с формулой Медведева [9] в случаях, когда замена одного грунта на другой вызывает увеличение параметров преломленной волны более чем в два раза без учета резонансов, противоречат физическим законам.
3. Определение расчетных пиковых ускорений путем умножения на один и тот же постоянный коэффициент, зависящий только от приращения балльности вне зависимости от толщины поверхностного слоя и частоты колебаний, искажает величину сейсмического воздействия.
4. Неправильное определение характеристик эталонного грунта может существенно исказить параметры расчетного сейсмического воздействия.
5. Процедура определения параметров эталонного грунта со средней сейсмической жесткостью  $655 \text{ (г/см}^3\text{)} \cdot \text{(м/с)}$  на основе формулы С.В. Медведева, которая несправедлива в этой области акустических жесткостей, чревата серьезными последствиями при землетрясениях.

Возникает вопрос: почему сейсмологи и геофизики не бьют тревогу, когда на уровне государственных нормативных документов предлагаются ошибочные положения в отношении оценок при сейсмическом районировании? Отсюда вытекает и другой вопрос: сколько в РФ уже дано неправильных оценок для расчета ответственных сооружений на сейсмические воздействия при использовании этих ошибочных положений?

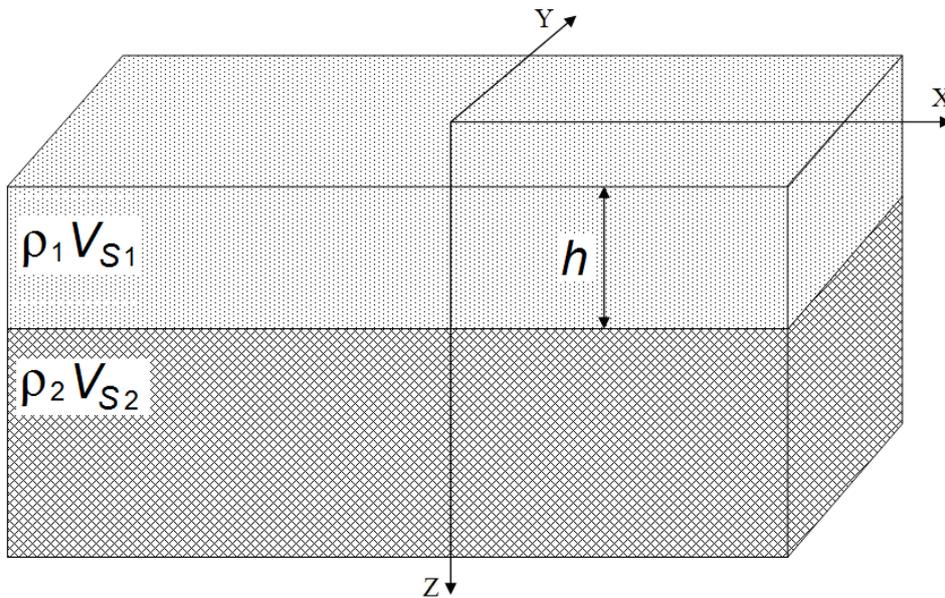
### **Аналитическая оценка влияния верхнего дисперсного слоя грунта на сейсмическое воздействие**

Для определения параметров волн на поверхности слоя, расположенного на поверхности упругого полупространства, воспользуемся методом решения задач теории упругости, основанном на свойствах **изображений** Фурье финитных функций<sup>4</sup>. Этот метод позволяет определять значения функций перемещений и напряжений на границах раздела

---

<sup>4</sup> *Финитная функция* – функция, носитель которой компактен (то есть она отлична от нуля только в пределах некоторой конечной области).). **Интеграл**  $\tilde{u}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{i\omega t} dt$  называется **прямым преобразованием Фурье**, а функция  $\tilde{u}(\omega)$  называется **Фурье-изображением** или **частотным спектром**.

сред, не находя решений дифференциальных уравнений. Исходными данными являются параметры волн, падающих на границу раздела. Расчетная схема представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Расчётная схема для определения значений функций перемещений и напряжений на границе раздела сред. Буквенные обозначения:  $h$  -- мощность поверхностного слоя;  $\rho_1 V_{S1}$  -- сейсмическая жесткость грунта верхнего слоя при распространении поперечных волн,  $\rho_2 V_{S2}$  -- сейсмическая жесткость грунта упругого полупространства при распространении поперечных волн;  $X, Y$  -- горизонтальные оси координат;  $Z$  -- вертикальная ось координат

Кратко опишем метод решения, представленный в работах [3, 11].

Дифференциальные уравнения колебаний среды в частных производных представляются в обобщенных функциях [3, 6, 8]. В правых частях записанных таким образом уравнений помимо нагрузки присутствуют и граничные функции, представляющие собой напряжения и перемещения. Множителями этих функций являются дельта-функции Дирака и производные дельта-функций.

Далее применяется преобразование Фурье по пространственной и временной координатам. Затем определяются выражения для изображений Фурье функций перемещений.

Для определения неизвестных функций на границах используется теорема Винера - Пэли -- Шварца, в соответствии с которой изображение Фурье финитной функции  $\hat{u}_1(\nu, \omega)$  (где  $\nu$  -- волновое число;  $\omega$  -- частота) является целой функцией. Для этой цели числитель изображения Фурье для перемещений приравнивается к нулю при нулевых знаменателях.

Для определения перемещений свободной поверхности слоя удобно воспользоваться теоремой взаимности, определив сначала смещение границы от приложенных к ней напряжений.

Дифференциальное уравнение, описывающее колебания верхнего слоя грунта, выглядит следующим образом:

$$\mu_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} - \rho_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = 0, \quad (22)$$

где  $\mu_1$  -- модуль сдвига грунта верхнего слоя;  $u_1$  -- горизонтальное перемещение его частиц;  $\rho_1$  -- плотность грунта;  $z$  -- вертикальная координата;  $t$  -- время.

Представим это уравнение в виде обобщенной функции, являющейся финитной в интервале  $(0, h)$ :

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} - \frac{1}{V_{S1}^2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = u_1(0, t) \delta'(z) + \frac{1}{\mu_1} \tau_1(0, t) \delta(z) - u_1(h, t) \delta'(z-h) - \frac{1}{\mu_1} \tau_1(h, t) \delta(z-h), \quad (23)$$

где  $h$  – мощность верхнего слоя грунта;  $V_{S1}^2 = \mu_1 / \rho_1$  – квадрат скорости распространения волн сдвига в верхнем слое грунта;  $u_1(0, t)$ ;  $u_1(h, t)$  – горизонтальное перемещение частиц грунта верхнего слоя на его поверхности и в его основании соответственно;  $\tau_1(0, t)$ ,  $\tau_1(h, t)$  – касательное напряжение в грунте верхнего слоя на его поверхности (положим, что оно равно нулю, так как касательное напряжение на свободной границе отсутствует) и в его основании соответственно;  $\delta(z)$ ,  $\delta(z-h)$  – дельта-функции Дирака от  $z$  и  $(z-h)$  соответственно;  $\delta'(z)$ ,  $\delta'(z-h)$  – производные дельта-функций Дирака от  $z$  и  $(z-h)$  соответственно.

Запишем дифференциальное уравнение, описывающее колебания грунта для полупространства, в виде функции, тождественно равной нулю при  $z < h$ :

$$\frac{\partial^2 u_2(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{V_{S2}^2} \frac{\partial^2 u_2(z, t)}{\partial t^2} = u_2(h, t) \delta'(z-h) + \frac{1}{\mu_2} \tau_2(h, t) \delta(z-h) \quad (24)$$

где  $V_{S2}^2 = \mu_2 / \rho_2$  – квадрат скорости распространения волн сдвига в упругом полупространстве;  $\mu_2$ ,  $\rho_2$  – соответственно модуль сдвига и плотность грунта полупространства;  $u_2(z, t)$ ,  $u_2(h, t)$  – горизонтальное перемещение частиц полупространства соответственно в точке с вертикальной координатой  $z$  и на границе с верхним слоем грунта;  $\tau_2(h, t)$  – касательное напряжение в полупространстве на границе с верхним слоем грунта.

В правых частях уравнений (23) и (24) помимо нагрузок представлены и функции перемещений, которые описываются с использованием производных дельта-функций Дирака. На свободной границе задана нагрузка  $\tau_1(0, t)$ .

Применив преобразование Фурье по времени и по пространственной координате к уравнениям (23) и (24), получим:

$$-\hat{u}_1(v, \omega) \cdot \left( v^2 - \frac{\omega^2}{V_{S1}^2} \right) = -i v \cdot \hat{u}_1(0, \omega) + \frac{1}{\mu_1} \cdot \hat{\tau}_1(0, \omega) + i v \cdot \hat{u}_1(h, \omega) \cdot e^{i v h} - \frac{1}{\mu_1} \cdot \hat{\tau}_1(h, \omega) \cdot e^{i v h}; \quad (25)$$

$$-\hat{u}_2(v, \omega) \cdot \left( v^2 - \frac{\omega^2}{V_{S2}^2} \right) = -i v \cdot \hat{u}_2(h, \omega) \cdot e^{i v h} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \hat{\tau}_2(h, \omega) \cdot e^{i v h}, \quad (26)$$

где  $\hat{u}_1(v, \omega)$ ,  $\hat{u}_2(v, \omega)$ ,  $\hat{u}_1(0, \omega)$ ,  $\hat{u}_1(h, \omega)$ ,  $\hat{u}_2(h, \omega)$ ,  $\hat{\tau}_1(0, \omega)$ ,  $\hat{\tau}_1(h, \omega)$ ,  $\hat{\tau}_2(h, \omega)$  – изображения Фурье функций  $u_1(v, \omega)$ ,  $u_2(v, \omega)$ ,  $u_1(0, \omega)$ ,  $u_1(h, \omega)$ ,  $u_2(h, \omega)$ ,  $\tau_1(0, \omega)$ ,  $\tau_1(h, \omega)$ ,  $\tau_2(h, \omega)$  соответственно;  $v$  – волновое число;  $\omega$  – частота;  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;  $e$  – основание натурального логарифма.

Изображения Фурье функций перемещений определяются выражениями:

$$\hat{u}_1(v, \omega) = - \frac{-i v \cdot \hat{u}_1(0, \omega) + \frac{1}{\mu_1} \cdot \hat{\tau}_1(0, \omega) + i v \cdot \hat{u}_1(h, \omega) \cdot e^{i v h} - \frac{1}{\mu_1} \cdot \hat{\tau}_1(h, \omega) \cdot e^{i v h}}{v^2 - \frac{\omega^2}{V_{S1}^2}}; \quad (27)$$

$$\hat{u}_2(v, \omega) = - \frac{-i v \cdot \hat{u}_2(h, \omega) \cdot e^{i v h} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \hat{\tau}_2(h, \omega) \cdot e^{i v h}}{v^2 - \frac{\omega^2}{V_{S2}^2}}. \quad (28)$$

Значения неизвестных функций на границах определяются для корней знаменателей выражений (27) и (28), соответствующих дифференциальным уравнениям. В соответствии с теоремой Винера -- Пэли -- Шварца изображение Фурье финитной функции  $\hat{u}_1(v, \omega)$  является целой функцией. Поэтому корни числителя и знаменателя должны совпадать.

Отсюда следует, что числитель выражения (27) должен быть равен нулю при подстановке в него корней знаменателя  $v_1$  и  $v_2$ , определяемых по формуле:

$$v_{1,2} = \pm \frac{\omega}{V_{S1}}. \quad (29)$$

Приравнявая к нулю числитель выражения (27) при значениях  $v_1$  и  $v_2$  в соответствии с формулой (29), получим два уравнения:

$$-i \cdot \frac{\omega}{V_{S1}} \cdot \hat{u}_1(0, \omega) + \frac{1}{\mu_1} \cdot \hat{\tau}_1(0, \omega) + i \cdot \frac{\omega}{V_{S1}} \cdot \hat{u}_1(h, \omega) \cdot e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - \frac{1}{\mu_1} \cdot \hat{\tau}_1(h, \omega) \cdot e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} = 0; \quad (30)$$

$$i \cdot \frac{\omega}{V_{S1}} \cdot \hat{u}_1(0, \omega) + \frac{1}{\mu_1} \cdot \hat{\tau}_1(0, \omega) - i \cdot \frac{\omega}{V_{S1}} \cdot \hat{u}_1(h, \omega) \cdot e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - \frac{1}{\mu_1} \cdot \hat{\tau}_1(h, \omega) \cdot e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} = 0. \quad (31)$$

Умножая все члены уравнений (30) и (31) на модуль сдвига и преобразовав их, получим:

$$-\rho_1 V_{S1} \cdot \hat{u}_1(0, \omega) + \rho_1 V_{S1} \cdot \hat{u}_1(h, \omega) \cdot e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - \frac{\hat{\tau}_1(h, \omega) \cdot e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h}}{i\omega} = -\frac{\hat{\tau}_1(0, \omega)}{i\omega}; \quad (32)$$

$$\rho_1 V_{S1} \cdot \hat{u}_1(0, \omega) - \rho_1 V_{S1} \cdot \hat{u}_1(h, \omega) \cdot e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - \frac{\hat{\tau}_1(h, \omega) \cdot e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h}}{i\omega} = -\frac{\hat{\tau}_1(0, \omega)}{i\omega}. \quad (33)$$

Еще одно уравнение получим из условия тождественного равенства нулю функции  $\hat{u}_2(z, \omega)$  при  $z < h$ :

$$-i \cdot \frac{\omega}{V_{S2}} \cdot \hat{u}_2(h, \omega) + \frac{1}{\mu_2} \cdot \hat{\tau}_2(h, \omega) = 0. \quad (34)$$

Отсюда:

$$\hat{\tau}_2(h, \omega) = \rho_2 V_{S2} \cdot i\omega \cdot \hat{u}_2(h, \omega) \quad (35)$$

Учитывая, что на границе раздела сред

$$\tau_1(h, t) = \tau_2(h, t); \quad (36)$$

$$u_1(h, t) = u_2(h, t), \quad (37)$$

получим:

$$-\rho_1 V_{S1} \cdot \hat{u}_1(0, \omega) + \rho_1 V_{S1} \cdot \hat{u}_2(h, \omega) \cdot e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - \frac{\rho_2 V_{S2} \cdot i \omega \cdot \hat{u}_2(h, \omega)}{i \omega} \cdot e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} = -\frac{\hat{\tau}_1(0, \omega)}{i \omega}; \quad (38)$$

$$\rho_1 V_{S1} \cdot \hat{u}_1(0, \omega) - \rho_1 V_{S1} \cdot \hat{u}_2(h, \omega) \cdot e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - \frac{\rho_2 V_{S2} \cdot i \omega \cdot \hat{u}_2(h, \omega)}{i \omega} \cdot e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} = -\frac{\hat{\tau}_1(0, \omega)}{i \omega}. \quad (39)$$

Отсюда следует:

$$\hat{u}_2(h, \omega) = \frac{2\hat{\tau}_1(0, \omega)}{i \omega \cdot \left[ \rho_1 V_{S1} \left( e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} \right) + \rho_2 V_{S2} \left( e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} + e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} \right) \right]}. \quad (40)$$

В соответствии с теоремой взаимности, если напряжения на поверхности верхнего слоя вызывают перемещения границы между слоями, равные  $\hat{u}_2(h, \omega)$ , то эти же напряжения, приложенные к границе между слоями, вызовут такие же перемещения поверхности верхнего слоя:

$$\hat{u}_1(0, \omega) = \frac{2\hat{\tau}_2(h, \omega)}{i \omega \cdot \left[ \rho_1 V_{S1} \left( e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} \right) + \rho_2 V_{S2} \left( e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} + e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} \right) \right]}. \quad (41)$$

Учитывая зависимость между напряжениями и перемещениями при распространении волн в полупространстве

$$\hat{\tau}_2(h, \omega) = \rho_2 V_{S2} \cdot i \omega \cdot \hat{u}_2(h, \omega), \quad (42)$$

получим:

$$\hat{u}_1(0, \omega) = \hat{u}_2(h, \omega) \cdot \frac{2\rho_2 V_{S2}}{\left[ \rho_1 V_{S1} \left( e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} - e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} \right) + \rho_2 V_{S2} \left( e^{i \frac{\omega}{V_{S1}} h} + e^{-i \frac{\omega}{V_{S1}} h} \right) \right]}. \quad (43)$$

Если в формуле (42) принять равными нулю выражения, соответствующие отраженным от свободной поверхности волнам (граница удалена на бесконечно большое расстояние от поверхности грунта), и не учитывать сдвиги волн во времени, то она превращается в уравнение Цёппригца:

$$\frac{\hat{u}_1(0, \omega)}{\hat{u}_2(h, \omega)} = \frac{2\rho_2 V_{S2}}{\rho_1 V_{S1} + \rho_2 V_{S2}} \quad (44)$$

Приведем уравнение (43) к более удобному виду:

$$\hat{u}_1(0, \omega) = \frac{\hat{u}_2(h, \omega)}{\left[ \cos\left(\frac{\omega h}{V_{S1}}\right) \right] \cdot \left[ 1 - i \cdot \frac{\rho_1 V_{S1}}{\rho_2 V_{S2}} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega h}{V_{S1}}\right) \right]}, \quad (45)$$

или

$$\frac{\hat{u}_1(0, \omega)}{\hat{u}_2(h, \omega)} = \frac{1}{\left[ \cos\left(\frac{\omega h}{V_{S1}}\right) \right] \cdot \left[ 1 - i \cdot \frac{\rho_1 V_{S1}}{\rho_2 V_{S2}} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega h}{V_{S1}}\right) \right]}. \quad (46)$$

Уравнения (45) и (46) описывают колебания верхнего слоя при нормальном падении волны из полупространства. Мнимая часть учитывает рассеивание энергии отраженными и уходящими в полупространство волнами. Если принять мнимую часть в знаменателях этих выражений равной нулю, то получится известное решение, соответствующее колебаниям слоя при заданных параметрах колебаний основания:

$$\frac{\hat{u}_1(0, \omega)}{\hat{u}_2(h, \omega)} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega h}{V_{S1}}\right)}. \quad (47)$$

Из выражения (46) можно определить резонансные частоты (или периоды) колебаний поверхностного слоя грунта, которые возникают вследствие отражения волн от свободной поверхности. Они определяются из условия:

$$\cos\left(\frac{\omega h}{V_{S1}}\right) = 0. \quad (48)$$

Наименьший период резонансных колебаний определяется выражением:

$$T_1 = \frac{4h}{V_{S1}}. \quad (49)$$

Решения (45) и (46) -- более точные, чем решение (47), так как учитывают рассеивание энергии волнами, уходящими в полупространство.

Еще более точное решение можно получить, если учесть гистерезисное демпфирование в слоях грунтов. В этом случае вместо формулы (22) будет рассматриваться следующее уравнение:

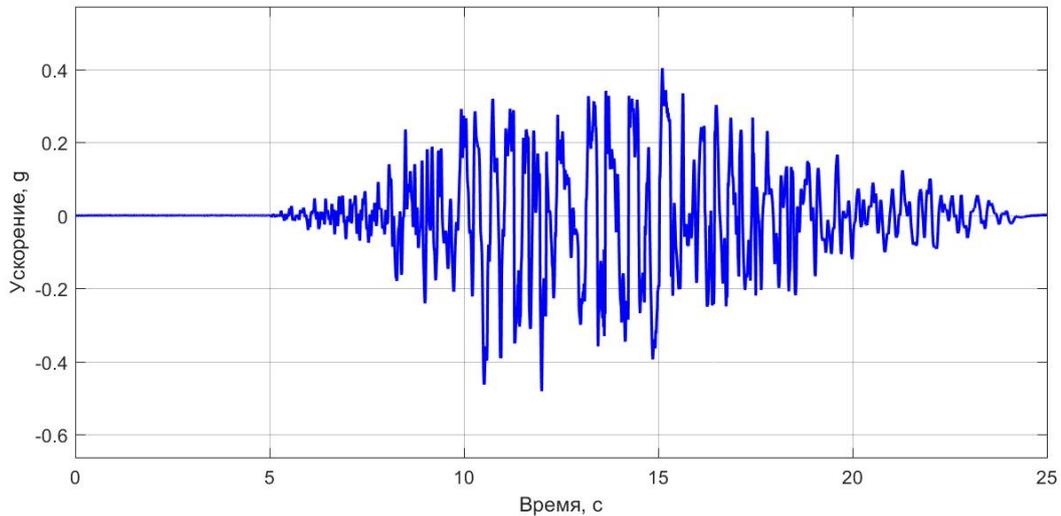
$$\frac{\partial^2 u_2(z, t)}{\partial z^2} + \frac{2\xi}{\omega} \cdot \frac{\partial^3 u_2(z, t)}{\partial t \partial z^2} - \frac{1}{V_{S2}^2} \cdot \frac{\partial^2 u_2(z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (50)$$

где  $\xi$  -- безразмерный коэффициент, описывающий гистерезисное демпфирование.

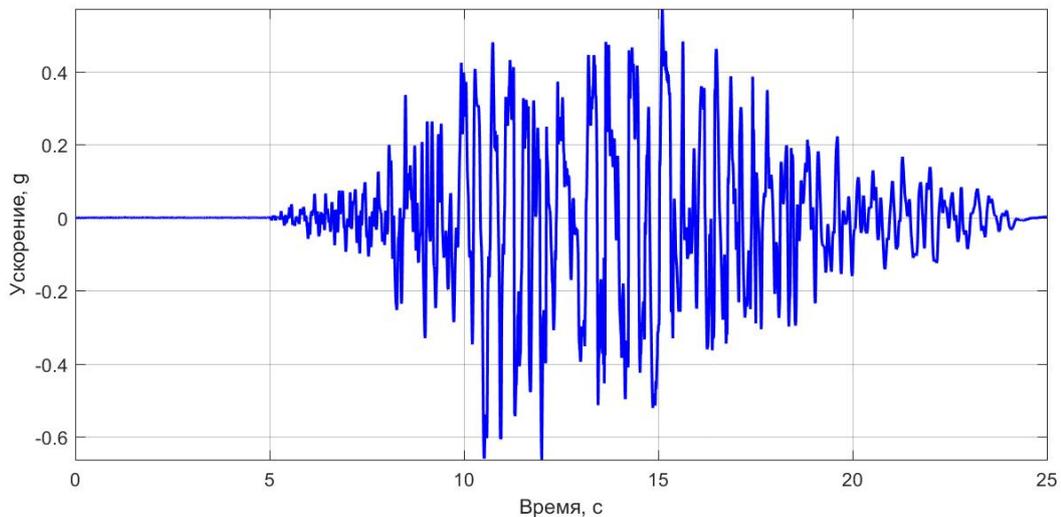
Полученные формулы (45) и (46) позволяют учесть влияние поверхностного слоя с учетом резонансных явлений в нем, демпфирования колебаний за счет энергии волн, уходящих в полупространство, а также гистерезисного демпфирования.

Для учета влияния поверхностного слоя в качестве исходных данных были взяты результаты расчетов, выполненных с использованием акселерограмм землетрясения

Лома-Приета<sup>5</sup> 1989 года: пиковое ускорение 0,481 g; продолжительность 25 с; жесткость верхнего слоя  $\rho_1 V_{S1} = 567\ 000\ \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ; жесткость упругого полупространства  $\rho_2 V_{S2} = 1216\ 000\ \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Акселерограммы и амплитудные спектры Фурье для этого случая представлены на рис. 4---7. Интерес представляют также спектры реакций -- исходные и преобразованные поверхностным слоем (рис. 8---13).

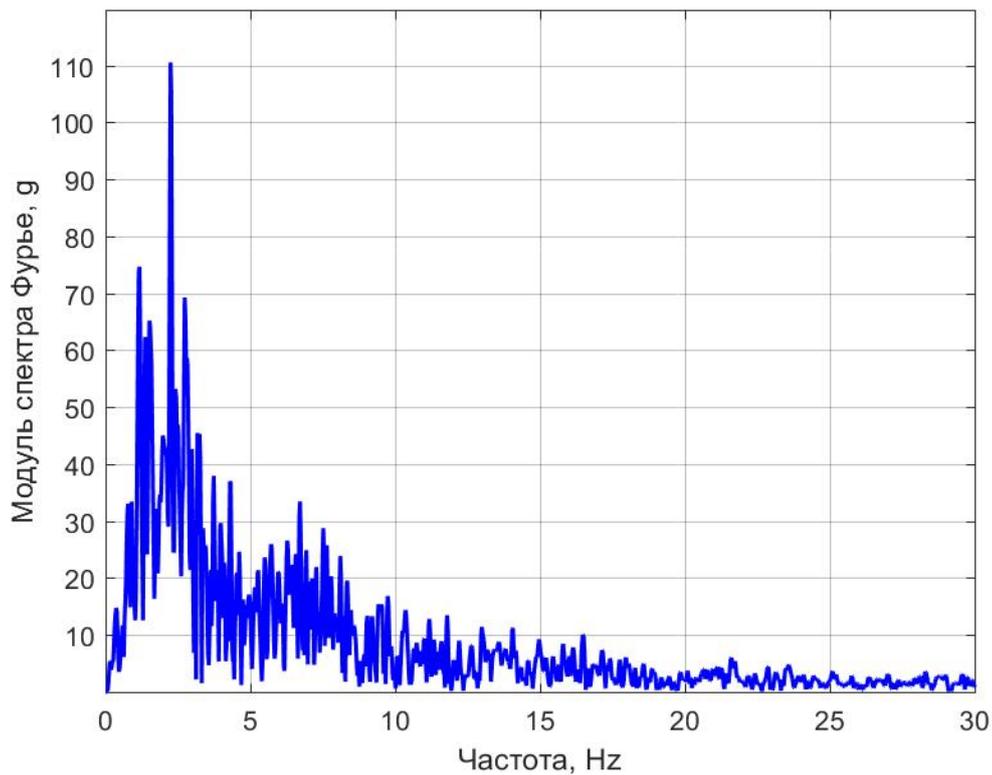


**Рис. 5.** Акселерограмма **колебаний грунта** на границе между упругим полупространством и верхним слоем грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года

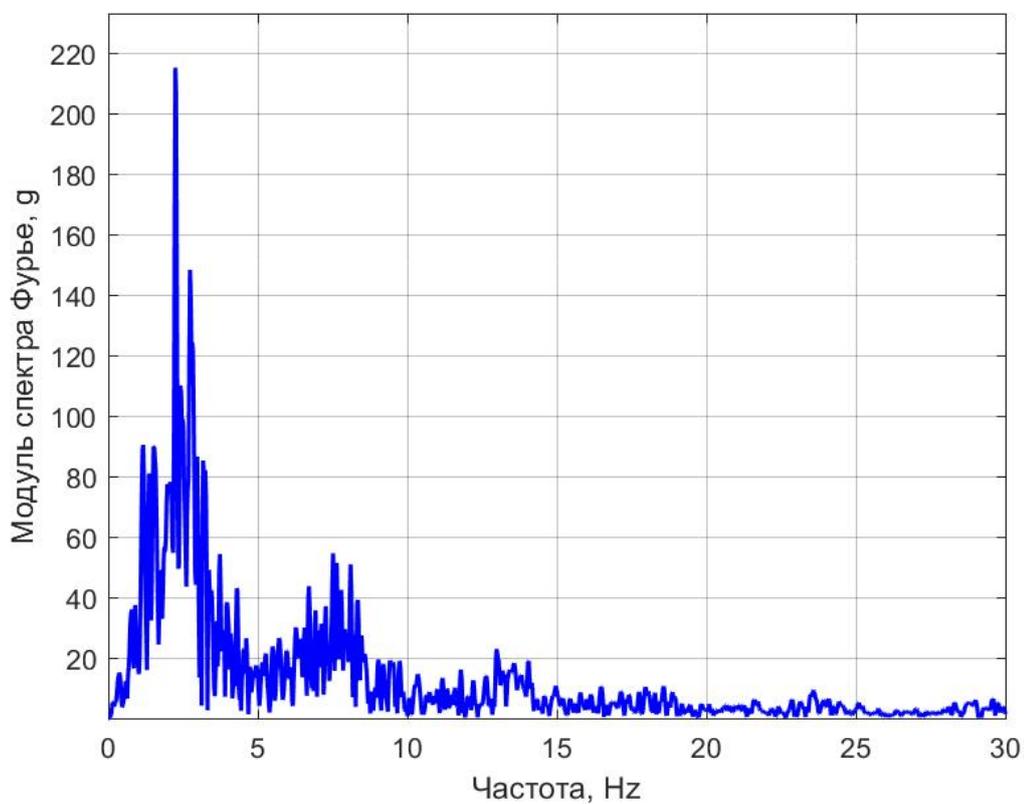


**Рис. 6.** Акселерограмма **колебаний грунта** на поверхности верхнего слоя грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года с учетом поправочного коэффициента

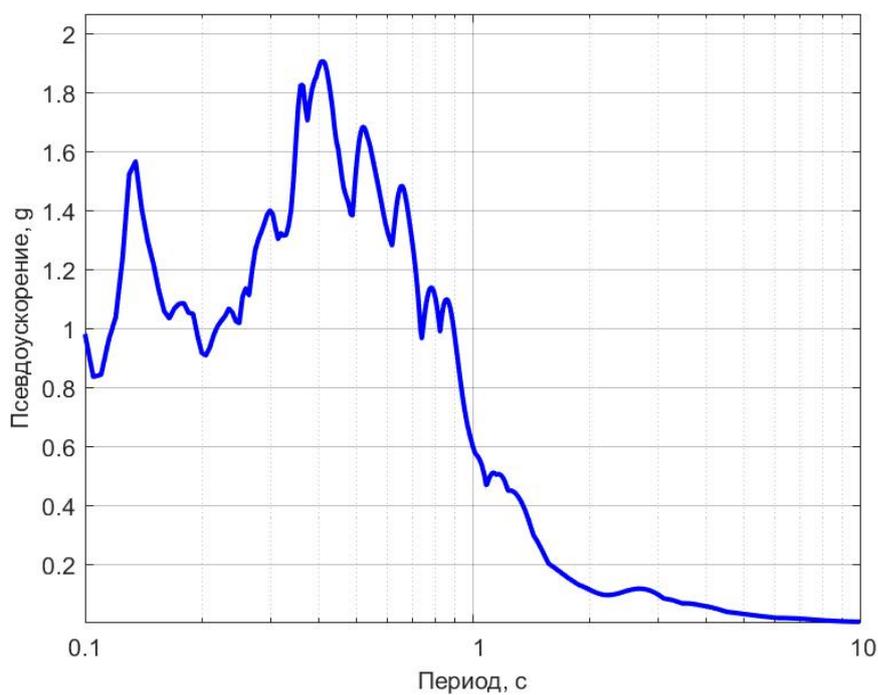
<sup>5</sup> Землетрясение Лома-Приета произошло 17 октября 1989 года в 17:01 по местному времени около г. Сан-Франциско (Калифорния, США). Эпицентр находился в 10 км от горной вершины Лома-Приета (Loma Prieta), очаг располагался на глубине 18 км от поверхности, магнитуда составляла 6,9---7,1.



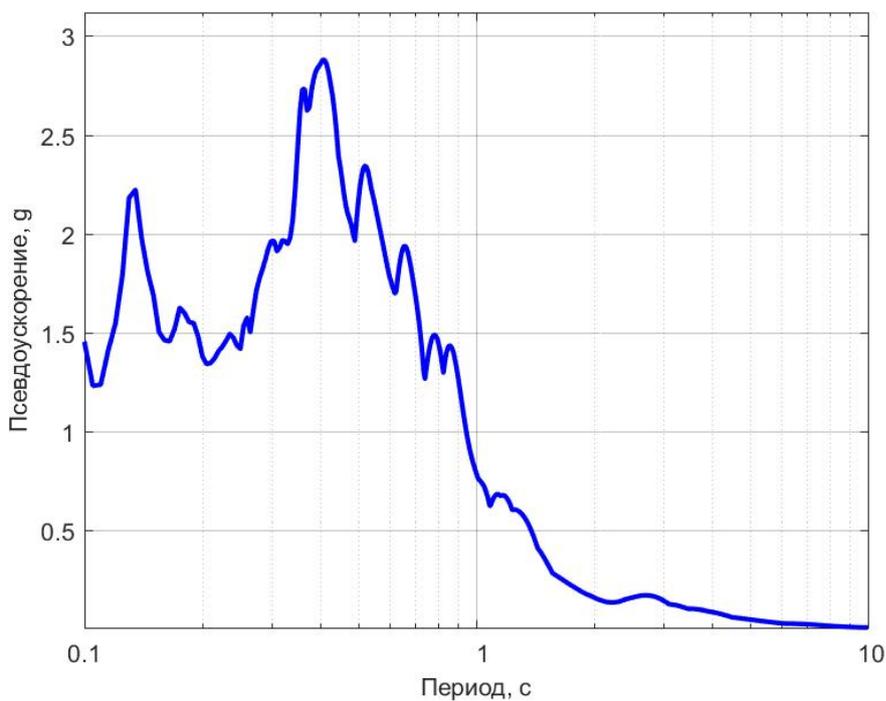
**Рис. 7.** Амплитудный спектр Фурье **акселерограммы колебаний границы** между упругим полупространством и верхним слоем грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года



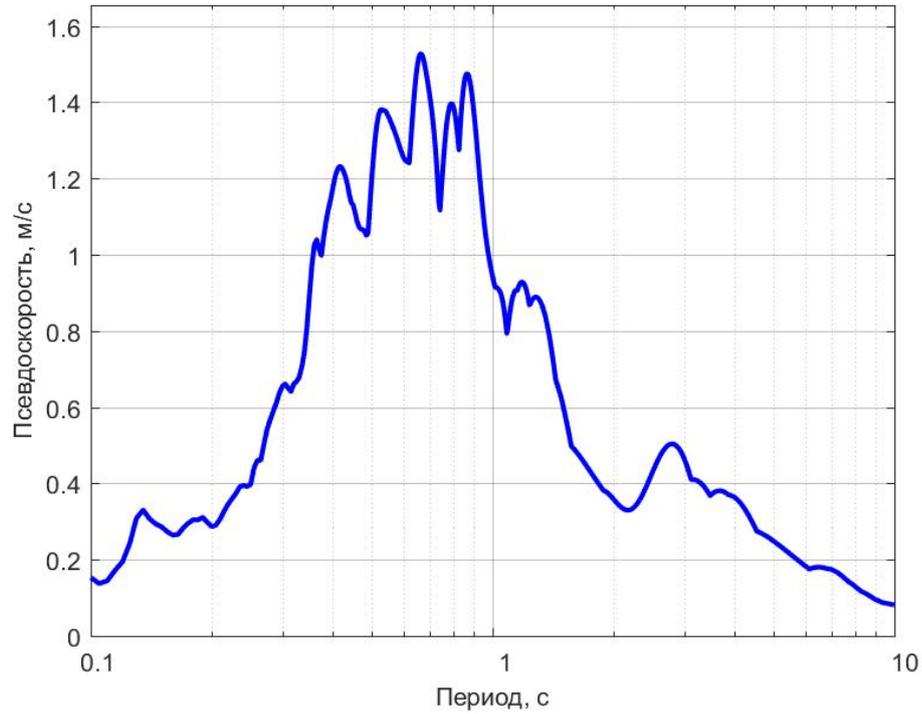
**Рис. 8.** Амплитудный спектр Фурье **акселерограммы колебаний** поверхности верхнего слоя грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года



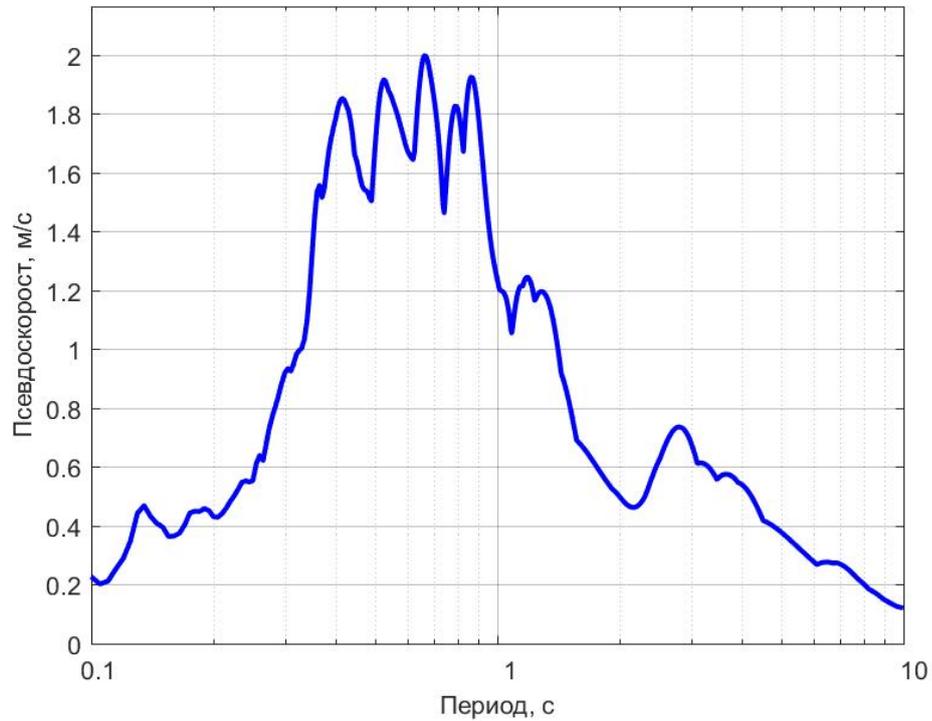
**Рис. 9.** Спектр реакций (псевдоускорений), соответствующий акселерограмме колебаний границы между упругим полупространством и верхним слоем грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года



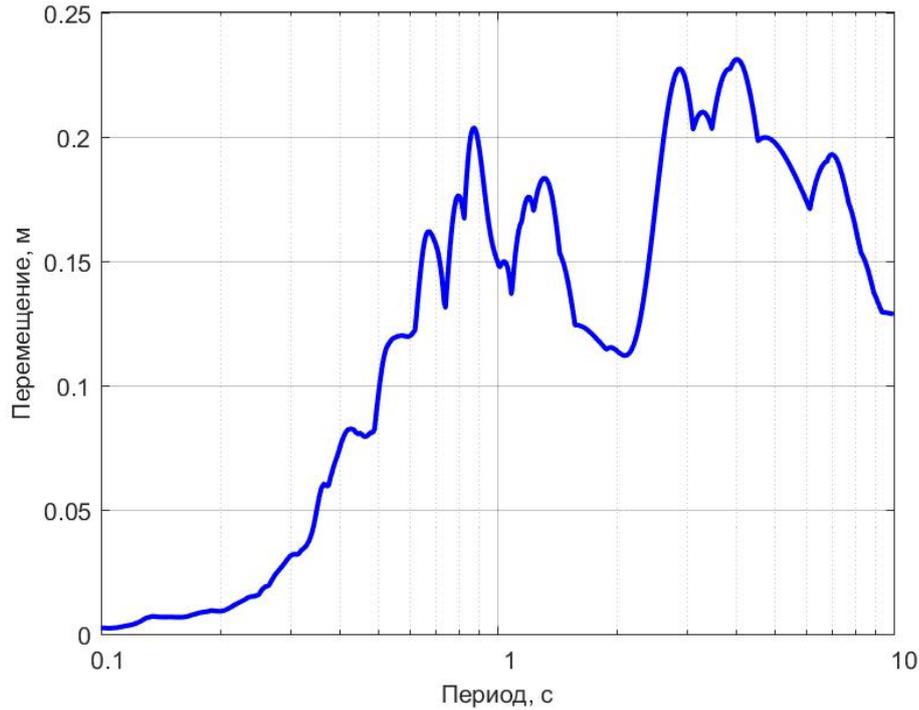
**Рис. 10.** Спектр реакций (псевдоускорений), соответствующий акселерограмме колебаний поверхности верхнего слоя грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года



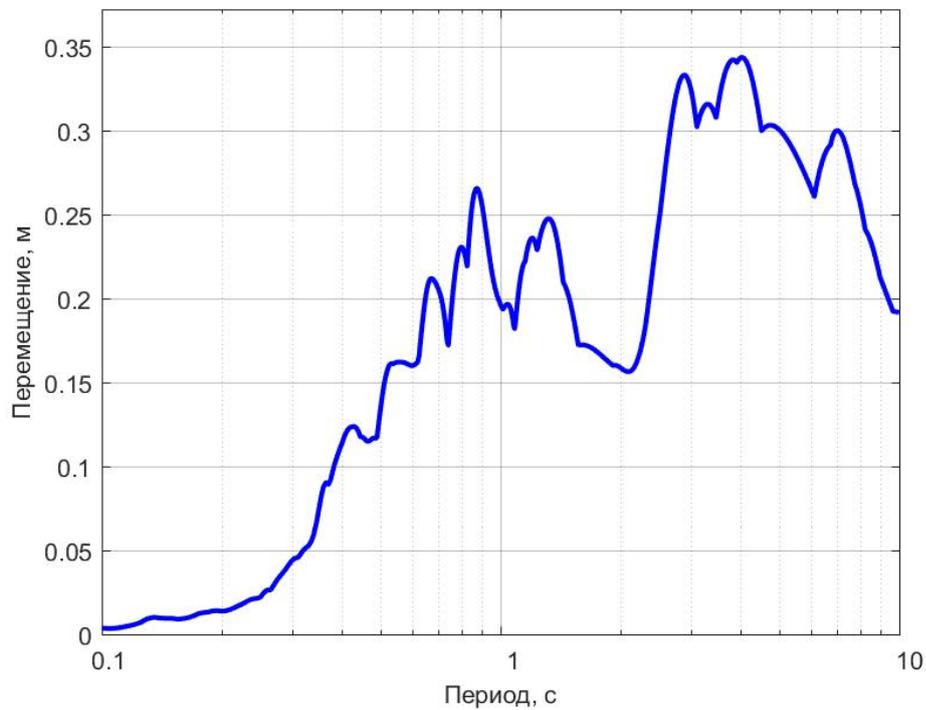
**Рис. 11.** Спектр реакций (псевдоскоростей), соответствующий акселерограмме колебаний грунта на границе между упругим полупространством и верхним слоем грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года



**Рис. 12.** Спектр реакций (псевдоскоростей), соответствующий акселерограмме колебаний поверхности верхнего слоя грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года



**Рис. 13.** Спектр реакций (перемещений), **соответствующий акселерограмме колебаний** границы между упругим полупространством и верхним слоем грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года



**Рис. 14.** Спектр реакций (перемещений), **соответствующий акселерограмме колебаний** поверхности верхнего слоя грунта при землетрясении Лома-Приета 1989 года

### **Анализ результатов**

Ввиду того, что землетрясение непродолжительное, резонансное усиление колебаний на частоте, соответствующей формуле (48) проявляются не слишком заметно. Увеличение параметров колебаний верхнего слоя по сравнению с нижним соответствует

акустическим жёсткостям:  $\rho_1 V_{S1} = 567\,000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и  $\rho_2 V_{S2} = 1216\,000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и по формуле Цёпритца составляет приблизительно 1,3.

## Заключение

Поскольку балльность нельзя непосредственно использовать в инженерных расчетах, ее перевод в амплитуды движений грунта при оценках сейсмичности производится по шкалам сейсмической интенсивности. И на этом этапе «царит произвол».

В большинстве стран мира сейсмическое районирование проводится не в баллах шкалы сейсмической интенсивности, а в параметрах сейсмических движений грунта.

В России исходными данными для построения карт сейсмического районирования в баллах являются оценки магнитуд в зонах возможных землетрясений. С точки зрения проектировщиков целесообразно сразу строить такие карты в изолиниях ожидаемых пиковых ускорений на основе параметров сейсмических источников, а не производить сначала расчеты ожидаемой балльности, а затем переводить ее значения в ускорения. Не ясно, почему сейсмологи предпочитают эмпирические формулы даже в тех случаях, когда воздействия можно описать физическими моделями и математическими выкладками.

В книгах «Теория упругости» В. Новацкого [5], «Уравнения математической физики» В.С. Владимирова [1], «Integral transform techniques for Green's function» К. Ватанабе (K. Watanabe) [12] и многих других используется современный математический аппарат для описания распространения волн от различных источников. Однако ни в каких действующих нормативных документах РФ не найдешь сноска на эти публикации.

Зарубежные нормативные документы по сейсмостойкости и районированию существенно отличаются от российских. В отличие от последних, например, американские стандарты, как правило, содержат математические модели и расчетные схемы, разработанные специалистами в области механики сплошных сред и инженерами-строителями. Американским ученым удалось приблизить сейсмическое районирование к нуждам сейсмостойкого строительства, а также к снижению сейсмического риска.

В российских нормах имеется большое количество эмпирических формул, которые приводятся без доказательств, без математических моделей и расчетных схем. За рубежом сейсмическое районирование с самого начала выполнялось под эгидой инженеров-строителей, специалистов в областях механики сплошных сред и динамики сооружений при участии сейсмологов и геологов. Наиболее успешно эти исследования проводятся в США.

Основную роль в развитии методологии сейсморайонирования в РФ играли геологи. И лишь в составлении карт ОСР-97 стали принимать участие сейсмологи и геофизики. Но инженеры-строители в этом практически не участвовали. Отсюда -- целый ряд ошибочных положений в российских нормативных документах. Очень часто в них приводится, например, фраза типа этой: «Для оценки приращения балльности Иванов предложил формулу...». Далее дается формула без указания модели, расчетной схемы, доказательств и статистики. Такой подход очень опасен и может привести к серьезным последствиям.

В качестве альтернативы в статье была представлена методика оценки сейсмических воздействий на поверхности слоя грунта, расположенного на упругом полупространстве, учитывающая резонансные явления, рассеивание энергии волнами, распространяющимися в полупространстве, и гистерезисное демпфирование колебаний в грунте.

Читатели приглашаются к дальнейшей дискуссии по данной проблеме.

### Список литературы

1. *Владимиров В.С.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1981. 512 с.
2. Методика и принципы проведения микросейсмозонирования (СМР) // Портал единой информационной системы (ЕИС) «Сейсмобезопасность России». URL: [http://seismorus.ru/sites/default/files/articles/Met\\_smr.doc](http://seismorus.ru/sites/default/files/articles/Met_smr.doc). Дата обращения: 17.01.2017.
3. *Курбацкий Е.Н.* Метод решения задач строительной механики и теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций: автореф. дис. ... док. техн. наук. М., 1995. 39 с.
4. *Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962. 260 с.
5. *Новацкий В.* Теория упругости / Пер. с польского М.: Мир, 1975. 872 с.
6. *Уломов В.И.* Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсмобезопасность России» // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39. № 1. С. 5---38.
7. *Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмостойкое строительство. 1998. № 4. С. 30---34.
8. *Шерифф Р., Гелдарт Л.* Сейсморазведка / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. Т. 1. 448 с.
9. *Шестоперов В.Г.* Сейсмическое микрорайонирование участков строительства моста: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М, 2006. 23 с.
10. *Шестоперов Г.С., Шестоперов В.Г.* МДС 22-1.2004. Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 48 с.
11. *Kurbatskiy E.* Seismic abatement method for nuclear power plants and seismic-isolation systems for structural elements // Infrastructure Systems for Nuclear Energy. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2013. P. 51---62.
12. *Watanabe K.* Integral transform techniques for Green's function. Cham ZG, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2014. 190 p.
13. *Zoeppritz K.* Uber reflexion und durchgang seismischer wellen durch unstetigkeits flachen // Uber Erdbebenwellen VII B. Nochr. Der Koniglichen Gesell. Wiss. Gottingen: Math.-Phys. Kl., 1919. P. 57---84.

### References

1. *Vladimirov V.S.* Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of Mathematical Physics]. М.: Nauka, 1981. 512 s. (Rus.).
2. Metodika i principy provedenija mikrosejsmorajonirovanija (SMR) [Methodology and principles of microseismozoning] // Portal edinoy informatsionnoy sistemy (EIS) «Seysmobezopasnost' Rossii» [The portal of the Integrated Information System (IIS) "Seismic safety of Russia"]. URL: [http://seismorus.ru/sites/default/files/articles/Met\\_smr.doc](http://seismorus.ru/sites/default/files/articles/Met_smr.doc). Data obrashcheniya: 17.01.2017. (Rus.).
3. *Kurbatskiy E.N.* Metod resheniya zadach stroitel'noy mekhaniki i teorii uprugosti, osnovanny na svoystvakh izobrazheniy Fur'e finitnykh funktsiy: avtoref. dis. ... dok. tekhn. nauk [A method of solving problems of structural mechanics and the theory of

- elasticity based on the properties of Fourier's transforms of finite functions: author's DSc thesis abstract]. M., 1995. 39 s. (Rus.).
4. *Medvedev S.V.* Inzhenernaya seysmologiya [Engineering Seismology]. M.: Gosstroyizdat, 1962. 260 s. (Rus.).
  5. *Novatskiy V.* Teoriya uprugosti [The theory of elasticity] / Per. s pol'skogo. M.: Mir, 1975. 872 s. (Rus.).
  6. *Ulomov V.I.* Aktualizatsiya normativnogo seysmicheskogo rayonirovaniya v sostave edinoy informatsionnoy sistemy «Seysmbezopasnost' Rossii» [Actualization of normative seismic zoning as a part of the unified information system "Seismic safety of Russia"] // Voprosy inzhenernoy seysmologii [Problems of Engineering Seismology]. 2012. T. 39. № 1. S. 5---38. (Rus.).
  7. *Ulomov V.I., Shumilina L.S.* Komplekt kart obshchego seysmicheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii [A set of maps of general seismic zoning of the Russian Federation territory] // Seysmostoykoe stroitel'stvo [Antiseismic construction]. 1998. № 4. S. 30---34. (Rus.).
  8. *Sheriff R.E., Geldart L.P.* Exploration Seismology. Volume 1. History, theory, & data acquisition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982. 272 p.
  9. *Shestoperov V.G.* Seysmicheskoe mikrorayonirovanie uchastkov stroitel'stva mosta: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Seismic microzoning of construction areas of a bridge: author's PhD thesis abstract]. M, 2006. 23 s. (Rus.).
  10. *Shestoperov G.S., Shestoperov V.G.* MDS 22-1.2004. Metodicheskie rekomendatsii po seysmicheskomu mikrorayonirovaniyu uchastkov stroitel'stva transportnykh sooruzheniy [MDS 22-1.2004. Guidelines for seismic microzoning of construction areas of transport structures]. M.: FGUP TsPP, 2005. 48 s. (Rus.).
  11. *Kurbatskiy E.* Seismic abatement method for nuclear power plants and seismic-isolation systems for structural elements // Infrastructure Systems for Nuclear Energy. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2013. P. 51---62.
  12. *Watanabe K.* Integral transform techniques for Green's function. Cham ZG, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2014. 190 p.
  13. *Zoepfritz K.* Uber reflexion und durchgang seismischer wellen durch unstetigkeits flachen // Uber Erdbebenwellen VII B. Nochr. Der Koniglichen Gesell. Wiss. Gottingen: Math.-Phys. Kl., 1919. P. 57---84.

Краткое содержание статьи на английском языке ↓↓↓

## ON THE ISSUE OF RECALCULATING INCREMENTS OF SEISMIC INTENSITY POINTS INTO GROUND-MOTION ACCELERATIONS

**KURBATSKY E.N.**

*Professor of the Department of Bridges and Tunnels of the Moscow State University of Railway Engineering, DSc (doctor of science in Technics), Moscow, .dynamic.miit@gmail.com*

**KOSAUROV A.P.**

*Postgraduate student of the Department of Bridges and Tunnels of the Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, artkp14@mail.ru*

In Russia initial data for calculation of engineering structures taking into consideration seismic impacts are traditionally given in seismic intensity points. The paper shows, that using Medvedev's formula in a wide frequency range for recalculating seismic intensity points into soil accelerations only on the basis of seismic (acoustic) impedances is wrong and can result in dangerous consequences. This formula is used in Russian normative documents groundlessly.

The authors prove, that Medvedev's formula is an approximate representation of Zoeppritz's formula which was developed in 1919 and is widely used in seismic exploration.

The application range of Medvedev's formula is limited. It does not take into account neither resonance phenomena, nor surface layer thicknesses, nor damping soil properties. Determination of soil categories by increments of seismic intensity points assuming that the increments are equal to one or even two or three points is a mistaken approach. Nevertheless, it has been widely used in Russia since 1962.

The authors present an alternative technique of estimating seismic effects on the surface of a soil layer on a half-space, which takes into consideration resonance phenomena, energy dissipation by waves in the half-space, and hysteretic damping of vibrations in the soil.

The article is published as a basis for discussion.