

УДК 550.34

DOI [10.37153/2618-9283-2021-3-8-18](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-3-8-18)

Сейсмическое районирование

Антирезонансные явления в сейсмическом микрорайонировании

Алешин А.С.¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва, Российская Федерация

Аннотация: Интерференция падающих и отраженных сейсмических волн в грунтовом массиве вблизи дневной поверхности является причиной возникновения резонансных эффектов. В практике сейсмического микрорайонирования (СМР) особое значение имеет резонансное увеличение суммарной сейсмической интенсивности. Вместе с тем при наличии инверсных слоев в толще грунта интерференция приводит к уменьшению интенсивности суммарного сейсмического воздействия, что естественно назвать антирезонансом. В статье рассмотрены условия возникновения антирезонанса и оценены пределы его эффективности. Особо отмечены природные и техногенные причины проявления антирезонанса и возможности использования его для уменьшения интенсивности сейсмических воздействий.

Ключевые слова: антирезонансный эффект, инверсный слой, техногенное и природное изменение свойств грунтового массива

Для цитирования: Алешин А.С. Антирезонансные явления в сейсмическом микрорайонировании // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 3. С. 8-18.

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-3-8-18](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-3-8-18)

Seismic zoning

The antiresonance phenomena in seismic microzonation

Aleshin Alexander S.¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, The Russian Academy of Sciences (IPE RAS).
Moscow, Russian Federation

Abstract: The interference of incident and reflected seismic waves in the ground massif near the day surface is the cause of resonant effects. In the practice of seismic microzonation (SMZ), a resonant increase in the total seismic intensity is of particular importance. At the same time, the presence of inverse layers in the ground layers interference leads to a decrease in the intensity of the total seismic impact, what is naturally named antiresonance. The article considers the conditions for the occurrence of antiresonance and evaluates the limits of its effectiveness. The natural and man-made causes of antiresonance and the possibility of using it to reduce the intensity of seismic impacts are particularly noted.

Keywords: antiresonance effect, inverse layer, technogenic and natural changes in the properties of the soil mass

@ А.С.Алешин, 2021

For citation: Aleshin A.S. The antiresonance phenomena in seismic microzonation. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 3, pp. 8-18. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-3-8-18](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-3-8-18)

Введение

Резонансные явления играют существенную роль в сейсмическом микрорайонировании. В одной из предыдущих статей было показано, что вклад резонансных явлений в суммарное приращение сейсмической интенсивности в экстремальных условиях имеет наибольшее значение среди прочих факторов инженерно-геологической обстановки [1]. Вместе с тем при обработке данных СМР в ряде случаев было отмечено уменьшение амплитуды сейсмических колебаний после прохождения слоистой толщи [2]. Это явление естественно обозначить термином «антирезонанс». Антирезонанс в механических системах подробно рассмотрен в ряде работ [3,4]. По-видимому, с явлением антирезонанса можно связать уменьшение сейсмических колебаний с использованием систем виброизоляции [5,6]. Однако опубликованных работ по учету антирезонансных явлений в сейсмическом микрорайонировании (СМР) нами не встречено. Данная статья посвящена более внимательному рассмотрению этой проблемы.

Методика исследований

Исследование антирезонансных явлений в данной статье основано на компьютерном моделировании. В самом общем виде модель сейсмогрунтовых условий определяется набором параметров – скоростью поперечных волн, плотностью, мощностью, константами поглощения и нелинейности каждого слоя, входящего в грунтовую толщу определенной суммарной мощности.

Грунт, как правило, представляет собой слоистую среду, свойства слоев которой различаются порой довольно заметно. Потому свойства слоистой сейсмической среды принято характеризовать величинами средних плотностей и средних скоростей поперечных волн, определяемых по формулам: $\rho_{ср.} = \sum \rho_i h_i / \sum h_i$; $V_{ср.} = \sum h_i / \sum (h_i / V_i)$ и средней сейсмической жесткостью $R_{ср.} = \rho_{ср.} \cdot V_{ср.}$.

В работе [7] было показано, что использование сейсмической жесткости в качестве характеристики свойств грунта более адекватно, чем значения средних (для 30-метровой толщи) скоростей $V_{s,30}$, соответствует результатам моделирования и, следовательно, должно быть положено в основу грунтовой классификации.

Предлагается все разнообразие локальных сейсмогрунтовых условий на исследуемой территории разделить на некоторое количество типовых моделей. Наиболее частым случаем, встречающимся в природе, является модель с постоянными значениями скоростей и плотностей в каждом слое, причем скорость и плотность слоев увеличивается с глубиной. Такой тип грунтового разреза естественно назвать «нормальным». Причиной роста сейсмической жесткости в литологически однородных слоях с глубиной является консолидация пород Земли под влиянием процессов метаморфизма и геостатического нагружения.

В противоположность такому «нормальному» закону изменения сейсмической жесткости с глубиной в ряде случаев существуют так называемые инверсные разрезы, в которых сейсмическая жесткость в нижележащих слоях характеризуется более низкими значениями, чем в вышележащих слоях.

Пример нормального и инверсного сейсмических разрезов приведен на рис. 1.

При моделировании задач СМР используются различные расчетные методики, позволяющие получать спектральные характеристики грунтовых толщ, и акселерограммы на свободной поверхности или во внутренних точках слоистой слабо поглощающей среды при падении на ее подошву под произвольным углом из нижнего полупространства продольной или поперечной упругой плоской волны. При заданных параметрах каждого слоя (скорости упругих волн, плотности и мощности слоя) скорости смещений и напряжения при переходе через границы раздела слоев могут быть выражены системой линейных уравнений, которая может быть представлена в матричном виде.

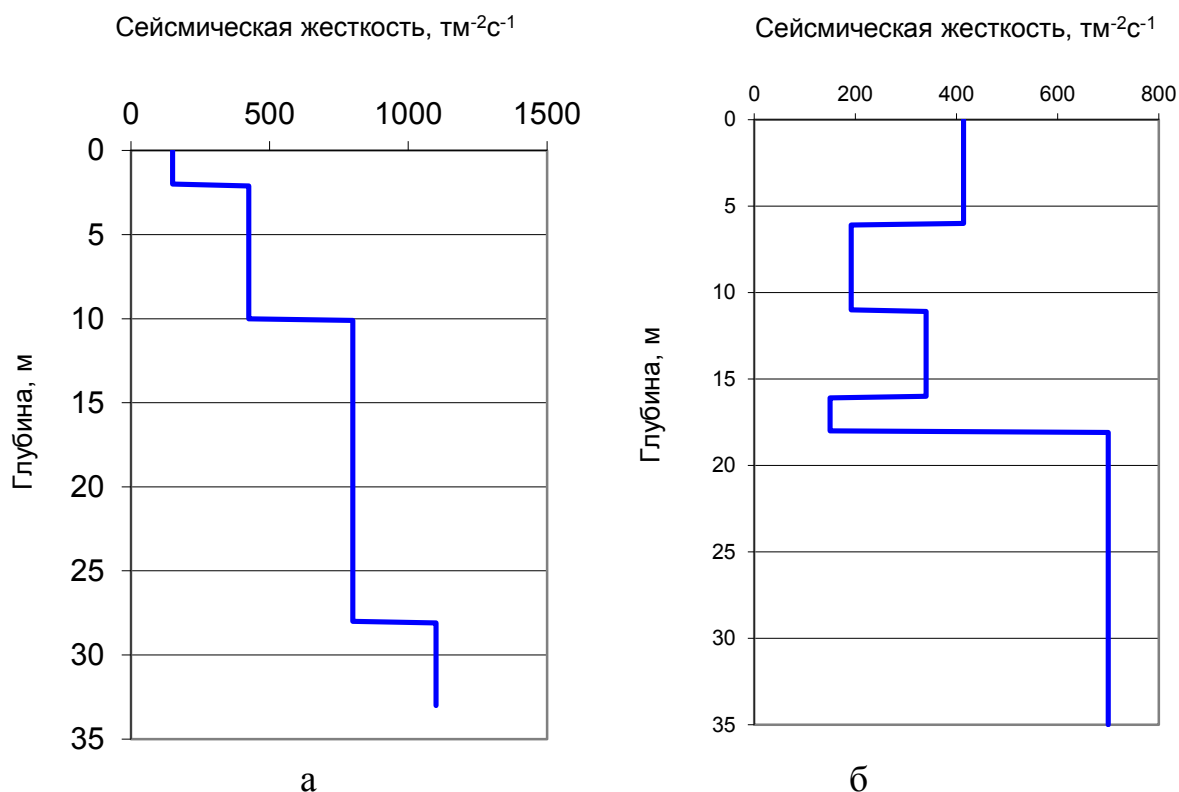


Рисунок 1 – Пример нормального (а) и инверсного (б) сейсмических разрезов

Figure 1 – Example of normal (a) and inverse (b) seismic sections

Из компьютерных программ, выполняющих расчеты отклика слоистой упругой среды на сейсмические воздействия на основе матричного метода наибольшее распространение получила программа *NERA* [8], предназначенная для расчета влияния слоистой грунтовой толщи на динамические характеристики сейсмических колебаний, источник которых находится в полупространстве, на поверхности грунта или в любом из слоев грунтовой толщи. Моделировалось одномерное (вертикальное) распространение волн в предположении, что слои грунтовой толщи залегают горизонтально. Расчеты могут проводиться как в линейном приближении, т.е. в предположении пропорциональности напряжений и деформаций, так и в нелинейном приближении на основе модели, учитывающей механизм нелинейного поведения грунтов при сильных сейсмических воздействиях. Входное воздействие задается в цифровом виде акселерограммой. Шаг квантования по времени Δt может изменяться, в соответствии с чем меняется длительность обрабатываемого процесса. Таким образом, общая длительность входной сейсмограммы может меняться в весьма широких пределах. Заданное сейсмическое

воздействие можно масштабировать по амплитуде. Скоростной разрез задается системой плоскопараллельных слоев, для каждого из которых задается значение мощности, плотности ρ и скорости V_s . Для каждого слоя задается также тип грунта – песчаный, глинистый, гравелистый или скальный. Соответственно с типом грунта в программе автоматически назначается специфическое поглощение и кривая нелинейной связи между напряжением и деформацией. На этом ввод исходных данных заканчивается. Вычислительная процедура программы *NERA* устроена на базе программы электронных таблиц *Excel*.

Важным методическим приемом компьютерного моделирования является возбуждение колебаний в модели с использованием короткого импульса длительностью один отсчет по времени. Практически столбик значений акселерограммы заменяется столбиком нулевых значений с единственным ненулевым значением, равным PGA, соответствующего сейсмического события. При моделировании линейных процессов это значение не должно превышать некоего порога, например, 0,1g. Преимуществом такого способа возбуждения является то, что в спектре входного воздействия присутствуют «все» частоты: при частоте квантования по времени 0,02 с все частоты ниже 50 Гц. С другой стороны возбуждение стандартным коротким импульсом позволяет получить частотную характеристику, свободную от особенностей спектра возбуждающего импульса и целиком определяемую параметрами грунтового массива.

Выходные данные *NERA* включают выдачу следующих сведений: импульсной реакции системы в виде спектральных характеристик или соответствующих акселерограмм. Помимо этих «стандартных» выходных данных имеется возможность получать коэффициенты динамичности – спектры реакции, нормированные на значения при «нулевом» периоде (или на высоких частотах сейсмического диапазона).

Для оценки интенсивности резонансных эффектов особое значение приобретает правильный выбор нулевой, реперной точки, относительно которой можно оценивать знак и степень проявления резонансов. С этой целью необходимо установить возможные эффекты для модели, в которой резонансные эффекты должны заведомо отсутствовать. Модель, соответствующая указанным условиям представлена слоем на полупространстве с совпадающими параметрами. Спектральная характеристика «безрезонансной» модели приведена на рис.2. Вариации параметров «безрезонансной» модели показали, что разброс значений максимума коэффициента динамичности b лежит в пределах 1,8 - 2,0. Относительно терминологии условимся считать, что резонанс имеет место при $b > 2,0$, а антирезонансу соответствует $b < 1,8$.

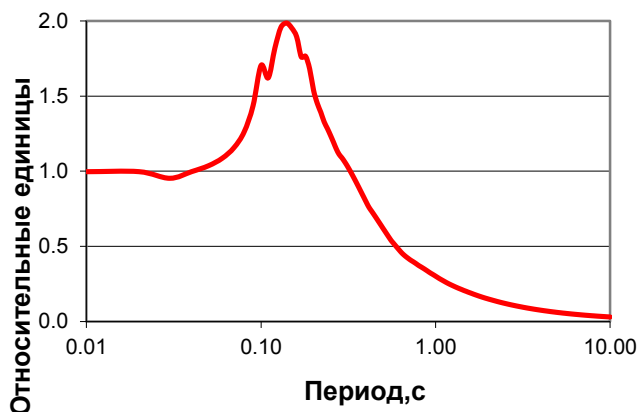


Рисунок 2 – Коэффициент динамичности модели «без резонанса»

Figure 2 – Dynamic coefficient of the "no resonance" model

Результаты моделирования

Рассмотрение результатов моделирования начнем с рассмотрения двух примеров – нормальной и инверсной моделей, приведенных на рис.3 и рис.4. Как видно из приведенных рисунков, максимумы коэффициентов нормального и инверсного сейсмических разрезов заметно различаются: для нормального $b = 2,7$, а для инверсного – $b < 1,7$. Таким образом, в последнем случае мы имеем дело с антирезонансом. Однако наличие инверсного разреза отнюдь не гарантирует наличие антирезонансных явлений, что показывает следующий пример, приведенный на рис.5.

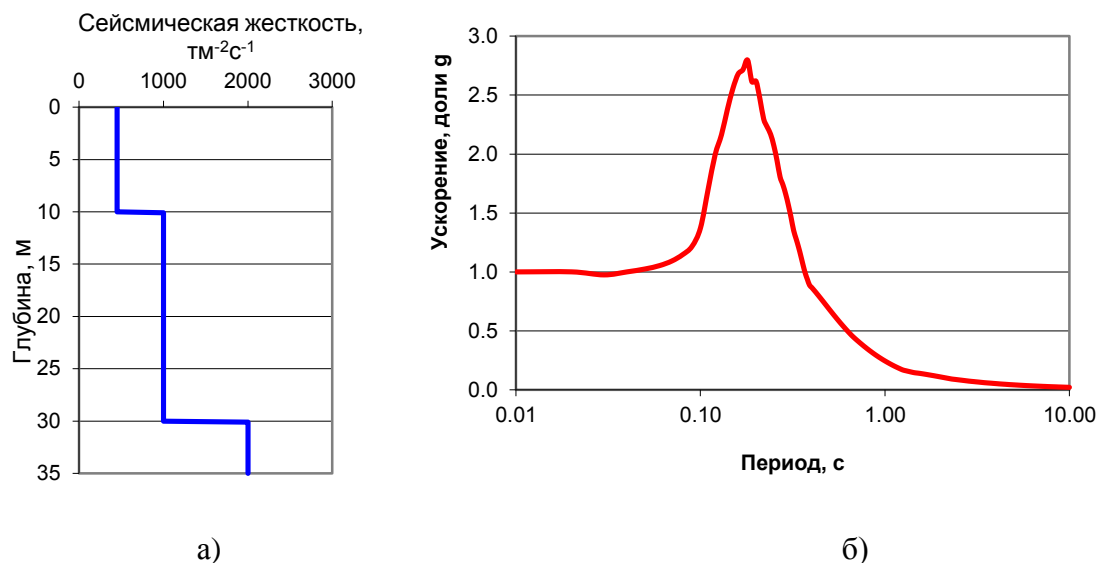


Рисунок 3 – Нормальный сейсмический разрез (а) и его коэффициент динамичности (б)

Figure 3 – The normal seismic section (a) and its dynamic coefficient (b)

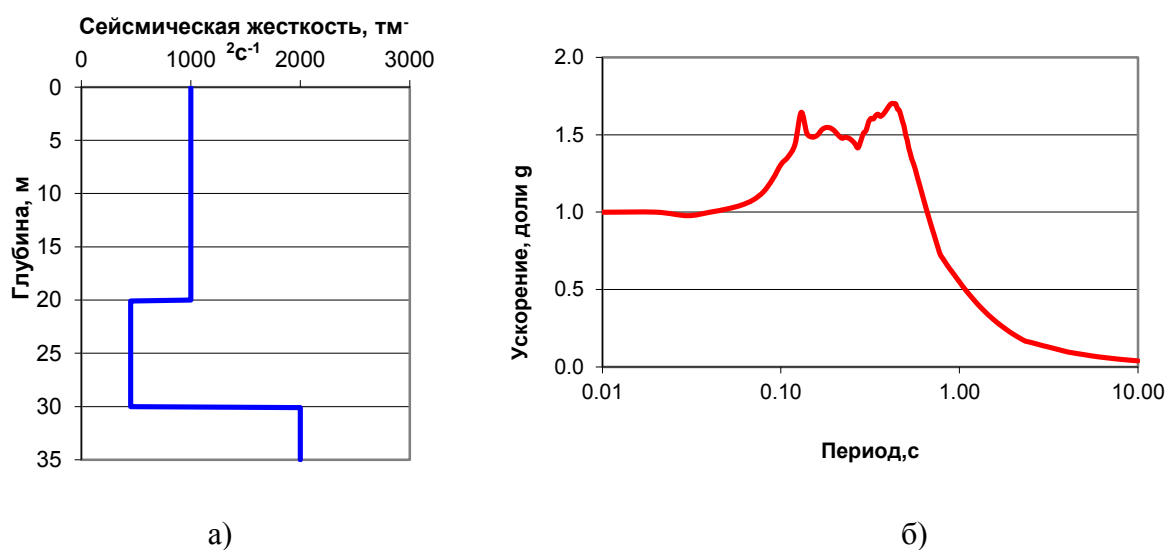


Рисунок 4 – Инверсный сейсмический разрез (а) и его коэффициент динамичности (б)

Figure 4 – The inverse seismic section (a) and its dynamic coefficient (b)

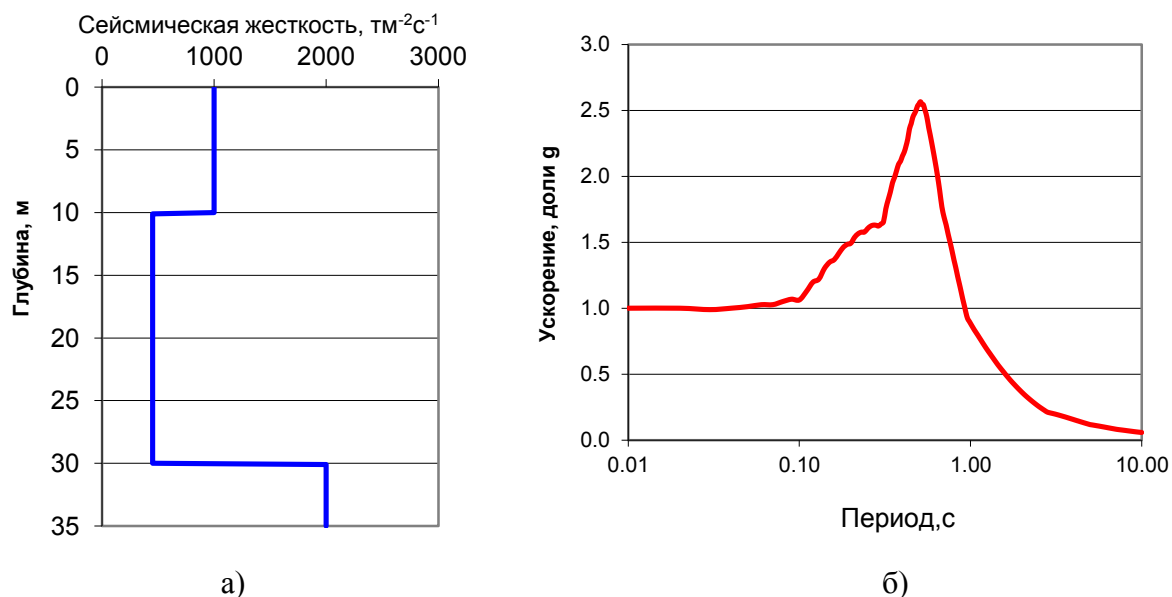


Рисунок 5 – Отсутствие антирезонанса (б) при наличии инверсного разреза (а)

Figure 5 – Absence of antiresonance (b) in the presence of an inverse section (a)

Серия модельных экспериментов показала, что резонанс возможен при выполнении следующих условий: $h_2 \geq h_1$; $R_2 \geq R_1$, где индексы 1 и 2 относятся соответственно к верхнему и нижнему слою. В противном случае, в той или иной мере имеют место условия существования антирезонанса. Рисунки 6-7 иллюстрируют выполнение указанных условий. Сначала рассмотрим «пограничный» вариант: $h_1=h_2=15$ м и $R_1=R_2$, что должно соответствовать наличию резонанса. Что это, действительно, так, показывает рис.6. Максимум коэффициента динамичности пусть незначительного, но превышает значение 2,0.

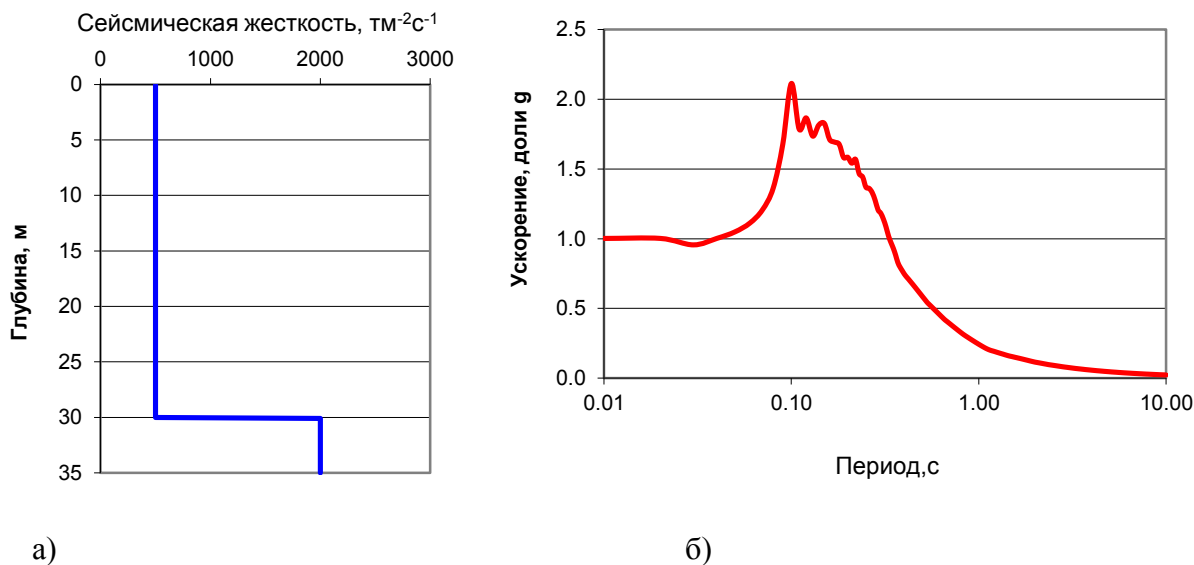


Рисунок 6 – Сейсмический разрез (а) и его коэффициент динамичности (б) при $h_1 = h_2$ и $R_1=R_2$

Figure 6 – Seismic cross-section (a) and its dynamic coefficient (b) by $h_1 = h_2$; $R_1=R_2$

С другой стороны, любое нарушение указанных условий должно вызывать признаки антирезонанса. Вид коэффициента динамичности при незначительном изменении сейсмической жесткости слоев показан на рис.7. Как видно из рис.7, максимум коэффициента динамичности $b = 1.7$, что соответствует условию антирезонанса.

В заключение этого раздела отметим, что все приведенные примеры моделирования явления антирезонанса показывают, что максимальный эффект, оцениваемый максимумом коэффициента динамичности, не выходит за пределы значений $b \geq 1.6$.

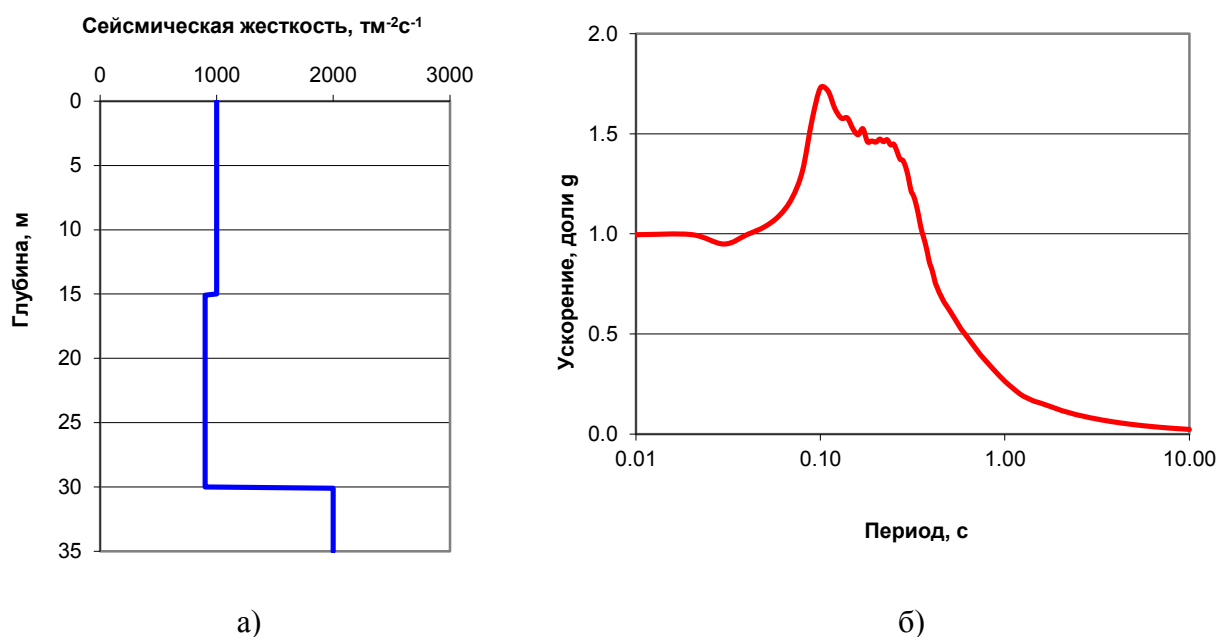


Рисунок 7 – Сейсмический разрез на площадке г. Сочи (а) и его коэффициент динамичности (б)

Figure 7 – Seismic cross-section on the site of Sochi (a) and its dynamic coefficient (b)

Область возможного применения

В этом разделе мы рассмотрим две возможности практического применения обнаруженного эффекта. Одна из них связана с природными причинами возникновения антирезонансных свойств в грунтовой толще. Выше было показано, что антирезонанс имеет место в случае, когда в грунтовом массиве встречаются инверсные слои. Возникает вопрос, насколько типичным является такое строение грунтовой толщи? Может быть оно настолько редко, что и учитывать его не стоит? При ответе на этот вопрос следует учесть, что традиционно наиболее распространенным методом сейсморазведочного изучения свойств грунтов является метод преломленных волн, что даже закреплено в соответствующих нормативных документах [9,10]. При этом надо иметь в виду, что методика с использованием преломленных волн принципиально непригодна для выделения инверсных слоев. Как альтернатива методу преломленных волн предлагается использование при инженерных изысканиях для целей сейсмического микрорайонирования скважинных методов – сейсмического каротажа и вертикального сейсмического профилирования. Целый ряд успешных реализаций данных предложений указывают на существенную роль инверсных слоев при изучении сейсмических свойств

грунтовой толщи. В качестве примера приведем на рис. 8 данные инженерных изысканий на площадке строительства одной из московских высоток.

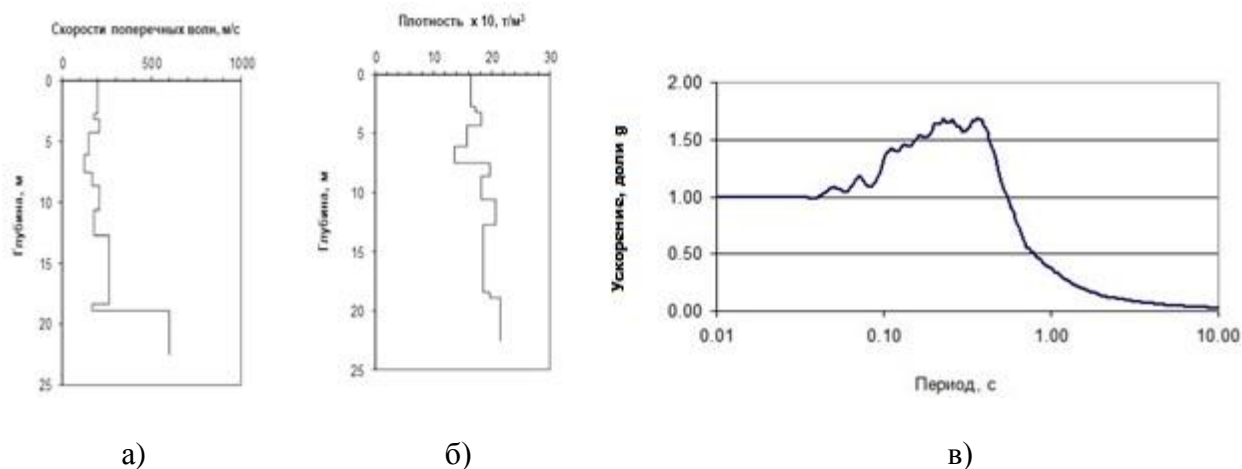


Рисунок 8 – Скоростной (а) и плотностной (б) разрезы грунта и его коэффициент динамичности (в)

Figure 8 – Velocity (f) and density (b) sections and its dynamic coefficient (c)

Очевидно, что максимум коэффициента динамичности оценивается величиной около 1,6.

Наличие инверсных слоев в грунтовом массиве может быть вызвано целым рядом причин. Например, достаточно мощный слой текучих илов в пойме реки, как это имеет место в Калининграде, или слой песков, перекрытый слоем гравийно-галечниковых пород, в Сочи. Во всех этих случаях имеет место проявление антирезонанса. Причем, казалось бы, относительно небольшое изменение параметров сейсмических моделей приводит к значительному изменению параметров сейсмических воздействий за счет исключения возможности проявления резонансов. Проиллюстрируем сказанное модельным примером, показанным на рис.9. Здесь приведены результаты инженерных изысканий, целью которых было выбрать расположение школьного здания в районе г. Сочи. Модели грунтов **M1** и **M2**, по которым рассчитывались спектры реакции, были основаны на данных скважин, пробуренных на сравнительно небольшом удалении друг от друга. Параметры моделей 30-метровой толщи грунтового массива, различающиеся только толщиной слоя галечников (что характерно для дельтовых отложений р. Мзымта), подстилаемого мощным слоем песков, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры сейсмических моделей грунтов в районе г. Сочи

Table 1 – Parameters of seismic models of soils in the area of Sochi

Описание слоя	Плотность, т/м ³	Скорость Vs, м/с	Мощность h, м	
			M1	M2
Галечники	2,1	350	16	8
Пески	1,9	230	14	22
Аргиллиты	2,5	800	∞	

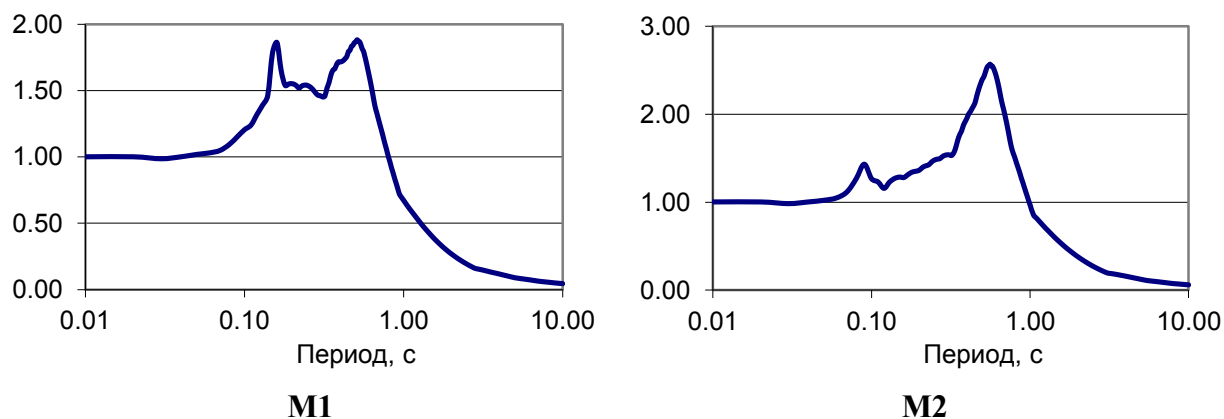


Рисунок 9 – Коэффициенты динамичности моделей грунта г. Сочи

Figure 9 – The dynamic coefficients of ground models of Sochi city

Можно привести другие примеры грунтовых условий, при которых возможно проявление антирезонансных эффектов. Например, участки распространения траптовых отложений или места распространения многолетнемерзлых пород. И в том и другом случае вышележащие слои отличаются от подстилающих их слоев и характеризуются более высокими значениями сейсмической жесткости, что является предпосылкой возникновения антирезонансных эффектов. Частично сказанное подтверждают результаты геокриологических наблюдений в скважинах, пробуренных в толще мерзлых пород на побережье Карского моря [11]. Однако в какой мере отмеченные сейсмогеологические условия сказываются на результатах сейсмического микрорайонирования до постановки и проведения целенаправленных экспериментов на указанных объектах полностью оценить достаточно трудно.

Другая область применения антирезонансных эффектов связана с возможностью техногенного изменения свойств грунтового массива. Такая возможность может быть реализована различными техническими способами. Один из них – это усиление грунтов основания сооружения с помощью внедрения щебеночных или бетонных свай. Особенно эффективно в случае значительной мощности (свыше 30 м) дисперсных грунтов с невысокой сейсмической жесткостью. Поскольку сейсмическая жесткость материала свай превышает сейсмическую жесткость грунтового массива, средняя сейсмическая жесткость усиленного грунта будет заметно выше аналогичной характеристики неизмененного грунта. Глубина погружения свай определяется в соответствии с выведенным выше условием: $h > 30-h$, что должно обеспечить выполнение условий возникновения антирезонанса и тем самым понизить уровень сейсмических воздействий. Такой способ был, в частности, использован при сооружении мостового перехода через Керченский пролив в районе косы Тузла.

Другой технический способ повышения сейсмической жесткости грунтового массива может быть связан с технологией способа «Геокомпозит», при котором в природный грунтовый массив под давлением закачивается цементный раствор. Образующиеся при инжектировании включения раствора в процессе нагнетания распространяются в стороны от инжектора на определенные расстояния и расширяются за счет увеличения объема поступающего раствора, что приводит к формированию вокруг инжектора при твердении раствора жесткого армирующего каркаса [12].

Практическая проверка высказанных здесь предложений может составить содержание последующих работ по сейсмическому микрорайонированию на площадках

строительства зданий и сооружений, основания которых расположены на территориях распространения слабых грунтов.

Заключение

Резонансные явления в грунтовой толще при проведении СМР зачастую являются причиной повышения интенсивности сейсмических воздействий. В данной работе установлены причины противоположного явления снижения интенсивности сейсмических воздействий вследствие интерференционных сейсмических процессов в грунтовой массе, что названо антирезонансом. Установлен критерий этого явления – наличие в грунтовой массе инверсных слоев достаточной мощности. Приведены примеры антирезонанса в практике СМР и определены границы эффекта. Вместе с тем, указано на возможность искусственного создания антирезонансного эффекта с помощью техногенного изменения свойств грунтового массива.

Литература

1. Алешин А.С. О динамическом диапазоне сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. №3. С.10-16.
2. Алешин А.С. О спектральных характеристиках грунтовой толщ // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. №5. С.16-23.
3. Вибрации в технике. Т.1. Москва: Машиностроение. 1978. 352 с.
4. Ольсон Г. Динамические аналогии. М.: Государственное издательство иностранной литературы. 1947. 224 с.
5. Савинов О.А. Сейсмоизоляция сооружений (концепция, принципы устройства, особенности расчета) // Динамические проблемы строительной техники. СПб.1993. С. 155-178.
6. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М.: Стройиздат. 1976.
7. Алешин А.С. О достоинствах и недостатках классификации грунтов NEHRP // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. №1. С.49-66.
8. Bardet J.P. and Tobita T. NERA. A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, April, 2001, p. 44.
9. Республиканские строительные нормы. РСН- 66-87. М.: Стройиздат. 1987.
10. Республиканские строительные нормы. РСН- 65-87. М.: Стройиздат. 1987.
11. Царев А.М., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г. и др. Использование волновых геофизических методов для изучения геокриологических условий на стационаре «Марре-Сале» // Десятая полярная конференция «Современные тенденции природных процессов в полярных областях Земли и перспективы российских полярных исследований», 6-8 октября 2014, Сочи, Россия, с.94-95.
12. Осипов В.И., Филимонов С.Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом «Геокомпозит» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. №5. С.15-21.

References

1. Aleshin A.S. About Dynamic range of SMZ. Earthquake engineering. Constructions safety. 2019, no.3, pp.16-22. (In Russian).
2. Aleshin A.S. On the spectral characteristics of the soil massif. Earthquake engineering. Constructions safety. 2018, no.5, pp.16-22. (In Russian).

3. The vibration in technic. Handbook.V.1, Mashinostroenie publishing house, 1978, 352 p. (In Russian).
4. Olson H. Dynamic analogies. Publishing house of foreign literature. 1947, 224 p. (In Russian).
5. Savinov O.A. Seismic isolation of structures (concept, principles of device, calculation features). Dynamic problems of construction techniques. SPb. 1993, pp.155-176. (In Russian).
6. Eisenberg J.M. Structures with switching-off connections for seismic areas. М.: Stroiiizdat, 1976. (In Russian).
7. Aleshin A.S. About the advantages and disadvantages of NEHRP soil classification// Earthquake engineering. Constructions safety. 2021, no.1, pp. 49-66. (In Russian).
8. Bardet J.P. and Tobita T. NERA. A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, April, 2001, p. 44.
9. Republican building codes. RSN-66-87. М.: Stroiiizdat, 1987. (In Russian).
10. Republican building codes. RSN-65-87. М.: Stroiiizdat, 1987. (In Russian).
11. Tsarev A. M., Sadurtdinov M.R., Skvortsov A. G. at al. The use of wave geophysical methods for studying geocryological conditions at the Marre-Sale stationary station. Tenth Polar Conference "Modern trends of natural processes in the Polar Regions of the Earth and Prospects for Russian Polar Research", 6-8 october 2014, Sochi, Russia, pp.94-95. (In Russian).
12. Osipov V.I., Filimonov S.D. Compaction and reinforcement of weak soils by the "Geocomposite" method. Bases, foundations and soil mechanics. 2002, no.5, pp. 15-21. (In Russian).

Данные об авторе/Information about author

Алешин Александр Степанович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва, Российская Федерация
asa@ifz.ru

Aleshin Alexander S., DSc, chief researcher, The Schmidt Institute of Physics of the Earth, The Russian Academy of Sciences (IPE RAS). Moscow, Russian Federation
asa@ifz.ru

Поступила в редакцию / Received – 03.06.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised – 16.06.2021

Принята к публикации / Accepted – 18.06.2021