

## **О ВЛИЯНИИ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ**

### ***Константин Владимирович Федин***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель кафедры геофизики; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доцент кафедры геофизических систем

### ***Юрий Иванович Колесников***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru; Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий геофизик

### ***Лакиморе Нгомайезве***

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант геолого-геофизического факультета, e-mail: Lngomayezwe@gmail.com

Приведены результаты экспериментов по оценке возможного влияния на сейсмобезопасность сооружений сезонных изменений собственных частот грунтов, лежащих в их основании. Показано, что резонансные свойства поверхностного грунтового слоя в течение года могут изменяться в существенно больших пределах, чем свойства построенных на них сооружений. Это может приводить к совпадению собственных частот грунтового слоя и стоящих на нем сооружений, что в конечном счете снижает сейсмобезопасность последних.

**Ключевые слова:** собственные колебания здания, сейсмобезопасность, резонансные свойства грунтового основания, сезонные изменения, пассивные сейсмические наблюдения.

## **ON THE INFLUENCE OF SEASONAL CHANGES IN THE NEAR SURFACE RESONANT PROPERTIES ON THE SEISMIC SAFETY OF STRUCTURES**

### ***Konstantin V. Fedin***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher of Laboratory of Seismic Dynamic Analysis, phone: (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Senior Lecturer of Geophysics Department; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Associate Professor of Department of Geophysical Systems

***Yury I. Kolesnikov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Chief Researcher of Laboratory of Seismic Dynamic Analysis, phone: (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru; Seismological Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptyug, Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Geophysicist

***Lucky more Ngomayezwe***

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate of Department of Geology and Geophysics, e-mail: Lngomayezwe@gmail.com

The results of experiments to assess the possible influence on seismic safety of structures of seasonal changes in the natural frequencies of the underlying soils are given. It is shown that the resonance properties of the surface soil layer during the year can vary more significantly than the properties of the structures built on them. This can lead to the coincidence of natural frequencies of the soil layer and the structures standing on it, which ultimately reduces their seismic safety.

**Key words:** natural oscillations of the building, seismic safety, resonance properties of the foundation bed, seasonal changes, passive seismic observations.

При строительстве зданий и инженерных сооружений, особенно в сейсмоактивных регионах, большое внимание уделяется их взаимодействию с основаниями – грунтами, на которых они возводятся. В частности, при проектировании таких объектов стараются следить за тем, чтобы их собственные частоты не совпадали с собственными частотами оснований, что позволяет в значительной мере нивелировать возможные резонансные явления при землетрясениях.

Однако, собственные частоты уже построенных сооружений в силу разных причин могут существенно отличаться от расчетных, в том числе из-за сезонных изменений климатических условий [7, 4]. Поэтому при обследовании и мониторинге технического состояния зданий и сооружений важная роль отводится экспериментальным методам определения собственных частот и форм колебаний таких объектов.

С другой стороны, очевидно, что со временем могут меняться динамические свойства не только самих надземных сооружений, но и их оснований, причинами чего могут быть сезонные промерзания и оттаивания грунта, изменения уровня грунтовых вод, влажности и температуры грунтов и т.д. В данном сообщении, на примере относительно недавно построенного в новосибирском Академгородке десятиэтажного жилого дома показано, что сезонные изменения резонансных свойств грунтовых оснований могут оказывать влияние на сейсмобезопасность надземных сооружений вне зависимости от изменения резонансных свойств самих сооружений.

Десятиэтажный четырехподъездный жилой дом, выбранный в качестве объекта настоящего исследования, находится в непосредственной близости от железнодорожной станции Сеятель, расположенной в пределах новосибирского Академгородка (рис. 1). Станция характеризуется довольно интенсивным железнодорожным движением, так как проходящая через нее железная дорога

связывает Новосибирск с южными районами Западной Сибири и Казахстаном. Соседство с железной дорогой приводит к тому, что данное здание испытывает повышенные вибрационные нагрузки, иногда сопровождающиеся, по словам жителей верхних этажей, характерными «поскрипываниями» в строительных конструкциях. Причем эти явления носят сезонный характер, а именно наблюдаются преимущественно в январе-феврале.

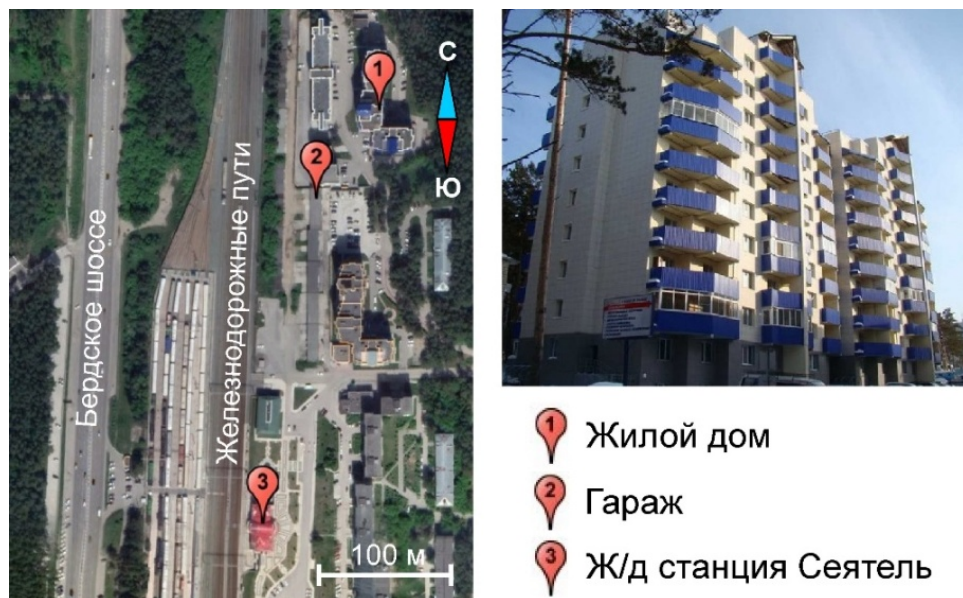


Рис. 1. Расположение жилого дома и гаража, в которых проводились наблюдения, по отношению к железнодорожным путям, и общий вид дома

Для того, чтобы оценить возможное влияние сезонных факторов на реакцию строительных конструкций на внешние вибрации, были проведены две серии экспериментов по регистрации сейсмоакустических шумов, как внутри исследуемого здания, так и вне его. Одна серия наблюдений проводилась в конце января, а вторая – в конце июня.

Для исследования собственных колебаний здания и приповерхностных грунтов в данной работе применялся метод, основанный на выделении стоячих волн из сейсмоакустических шумов. Суть метода сводится к накоплению большого числа амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на осредненных спектрах появляются последовательности пиков, соответствующие семействам стоячих волн разных типов. Этот метод применялся ранее при физическом моделировании стоячих волн в различных объектах [2, 5], а также был успешно опробован на результатах натуральных экспериментов [2,3,5].

Регистрация сейсмоакустических шумов проводилась в зимний и летний периоды в одних и тех же точках в одном из подъездов исследуемого здания, а также в подвале одного из находящихся поблизости гаражей. Для регистрации использовались горизонтальные геофоны GS20DX и одноканальные автономные цифровые регистраторы Texan (RefTek-125A) с частотой дискретизации 1 кГц.

При обработке шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью примерно по 8.2 с (8192 отсчета) и вычислялись их амплитудные спектры. Далее для каждой точки наблюдений производилось осреднение амплитудных спектров всех фрагментов. Осредненные таким образом спектры использовались для оценки собственных частот и форм поперечных колебаний здания, а также для оценки собственных частот сдвиговых горизонтальных колебаний слоя поверхностных грунтов, лежащих в его основании.

В здании регистрация шумов производилась на вертикальном профиле наблюдений на внутренней стене лестничной клетки второго подъезда, находящегося в двухсекционной части дома, ориентированной вдоль железной дороги. То есть регистрировались горизонтальные колебания двухсекционной части дома в направлении, перпендикулярном к железнодорожному полотну. Однозначно идентифицировать тип стоячих волн (изгибных, крутильных или более сложных) в трехмерном объекте при измерениях, проводимых на линейном вертикальном профиле наблюдений, затруднительно. Поэтому выделяемые из шумовых записей собственные колебания дома в этом направлении в дальнейшем будем называть поперечными модами вне зависимости от их типа.

Длительность непрерывной записи в каждой точке наблюдений составляла 30 минут. На рис. 2 приведены обобщенные (осредненные по времени и по всем точкам наблюдений) амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в здании в летний и зимний периоды. Как можно видеть, на обоих спектрах наблюдается ряд пиков (на рисунке они помечены номерами от 1 до 10), частоты которых не зависят от времени года, несколько отличаются лишь их амплитуды.

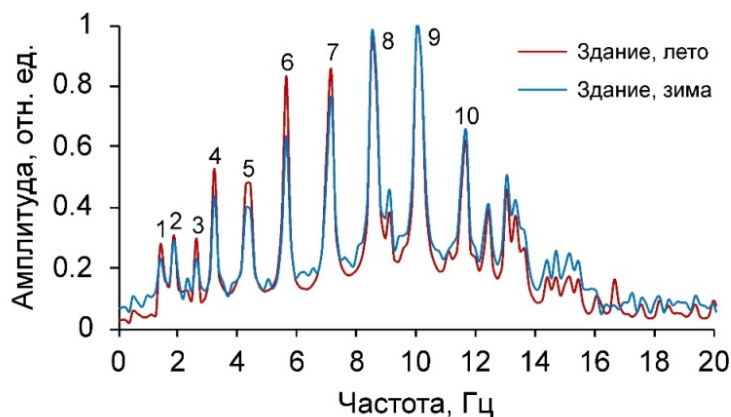


Рис. 2. Осредненные и нормированные амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в здании в летний и зимний периоды

То, что это частоты мод собственных колебаний здания, а не его вынужденных колебаний, инициируемых какими-либо внешними гармоническими источниками, иллюстрирует рис. 3, на котором показано распределение по высоте

дома амплитудных спектров, полученных по результатам зимних наблюдений (летние результаты отличаются лишь в деталях). Из рисунка видно, что амплитуды этих спектральных пиков меняются по высоте дома закономерно, образуя чередующиеся последовательности узлов и пучностей, причем с ростом частоты число узлов и пучностей возрастает.

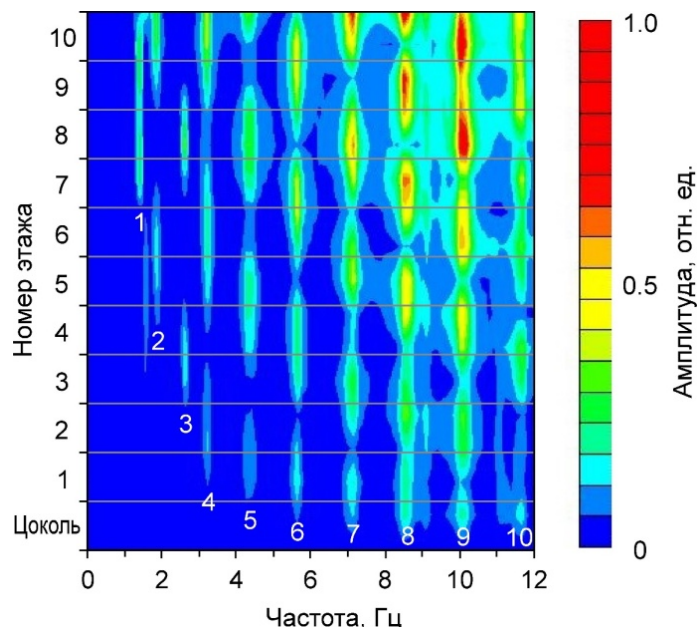


Рис. 3. Распределение осредненных амплитудных спектров по высоте здания

Такая картина (чередование узлов и пучностей) характерна для стоячих волн, поэтому частоты наблюдаемых на спектрах пиков идентифицированы как частоты мод поперечных собственных колебаний изучаемого здания. Нужно заметить, что цифры, которыми отмечены спектральные пики на рис. 2, являются их условными порядковыми номерами, но не номерами мод, которые, как отмечалось выше, могут иметь разную природу.

Собственные частоты, определяемые положением спектральных пиков на оси частот (рис. 2), для зимних и летних измерений совпадают с точностью до спектральной разрешающей способности эксперимента, в нашем случае это 0.12 Гц. То есть сезонные изменения определенных нами собственных частот здания, по крайней мере для большинства мод, не превышают нескольких процентов.

Оценка собственных частот сдвиговых горизонтальных колебаний слоя поверхностных грунтов производилась по амплитудным спектрам микросейсм, зарегистрированных в подвале гаража, расположенного примерно в 60 м от рассматриваемого здания (рис. 1). Для наблюдений использовался горизонтальный геофон, ориентированный примерно в перпендикулярном к железнодорожным путям направлении.

Учитывая предыдущий опыт определения резонансных свойств верхней части разреза [3], продолжительность непрерывной записи микросейсм как в зимний, так и в летний периоды здесь была увеличена примерно до недели. В результате осреднения амплитудных спектров фрагментов полученных шумовых записей на осредненных спектрах появились характерные для стоячих волн в приповерхностном слое регулярные пики (рис. 4).

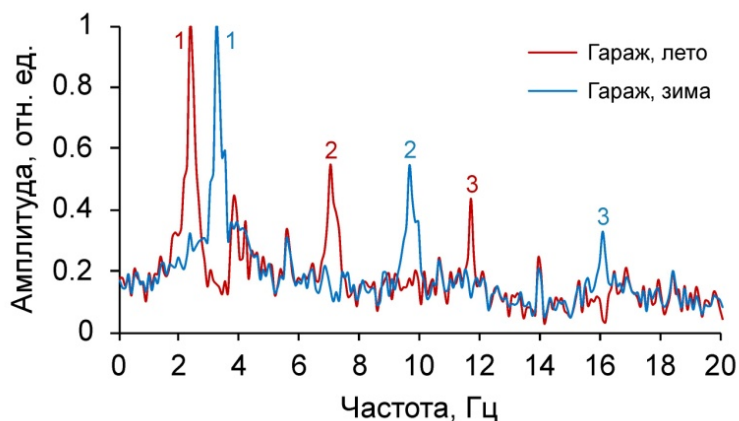


Рис. 4. Осредненные по времени нормированные амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в подвале гаража в летний и зимний периоды; цифрами отмечены номера мод стоячих волн

Как известно [6], интервал между соседними собственными частотами грунтового слоя, лежащего на жестких породах, равен удвоенной частоте низшей моды стоячих волн. Для обоих спектров на рис. 4 эта закономерность выполняется для трех отмеченных цифрами пиков (трех низших мод стоячих волн сдвига), погрешность находится на уровне спектральной разрешающей способности. Так частоты пиков, полученные по летним наблюдениям, равны 2.32 Гц, 7.08 Гц и 11.72 Гц, а по зимним – 3.17 Гц, 9.64 Гц и 16.1 Гц.

Таким образом, собственные частоты сдвиговых колебаний поверхностного грунтового слоя, определенные по результатам измерений в подвале гаража в январе, превышают частоты, полученные по данным июньских наблюдений, примерно на 37%. Эти отличия примерно на порядок превышают возможные сезонные изменения резонансных свойств здания. Абсолютное изменение частоты самой высокоамплитудной низшей моды слоя за период между зимними и летними измерениями составило 0.85 Гц, что превышает разность частот между любыми соседними пиками для первых четырех мод поперечных колебаний здания, приходящихся на этот же частотный диапазон (1.34 Гц, 1.83 Гц, 2.56 Гц и 3.17 Гц). Из этого следует, что в определенные периоды времени частоты некоторых поперечных мод собственных колебаний здания и сдвиговых горизонтальных колебаний приповерхностного слоя могут совпадать, что может вести к снижению сейсмобезопасности данного сооружения.

В этом можно убедиться, если сравнить спектры записей, зарегистрированных в здании и в гараже летом и зимой (рис. 2 и рис. 4). Так в летний период частота наиболее интенсивной низшей моды собственных сдвиговых колебаний слоя (2.32 Гц) заметно отличается от наиболее близких к ней частот поперечных мод собственных колебаний здания (1.83 Гц и 2.56 Гц). В то же время в зимний период частота низшей моды собственных сдвиговых колебаний слоя (3.17 Гц) совпадает с точностью до спектральной разрешающей способности с частотой одной из поперечных мод собственных колебаний здания, отмеченной на рис. 2 цифрой 4, что может приводить к усилению возможных резонансных явлений в здании на этой частоте.

Вибрации от рельсового транспорта воздействуют на находящиеся вблизи железнодорожных путей сооружения, в основном в диапазоне частот приблизительно от 1 до 250 Гц [1]. Частотный состав таких вибраций определяется множеством факторов: расстояниями между стыками рельсов, опорными элементами железнодорожного пути, колесными парами и т.д. Один из основных факторов – скорость движения поездов. Так как исследуемый объект расположен недалеко от железнодорожной станции, при приближении к которой или удалении от нее по крайней мере часть поездов плавно снижает или увеличивает скорость, то спектр создаваемых ими вибраций может изменяться в довольно широких пределах.

Значительное усиление в определенные промежутки времени вибраций от поездов на частотах, совпадающих с собственными частотами рассматриваемого здания, может приводить к резонансным явлениям в нем. Если же вследствие сезонных изменений с какими-либо из этих частот совпадут или станут к ним близки и собственные частоты приповерхностных грунтов, то эти явления должны проявляться еще сильнее. Наблюдаемые в январе-феврале жителями данного дома аномальные явления при прохождении поездов – «поскрипывания» в строительных конструкциях (или в местах их креплений и соединений), – по-видимому, и являются следствием такого совпадения на частоте 3.17 Гц. Учитывая распределение пучностей по высоте дома для моды с номером 4 (рис. 4), наибольшее воздействие от колебаний на этой частоте и вызванных ими аномальных явлений должно ощущаться жителями девятого-десятого и, в несколько меньшей степени, шестого этажей.

Хотя полученные оценки собственных частот приповерхностного грунтового слоя могут отличаться от собственных частот этого слоя непосредственно под исследованным зданием, результаты проведенных измерений свидетельствуют о том, что сезонные изменения резонансных свойств приповерхностных грунтов в определенные периоды времени могут снижать сейсмобезопасность возведенных на них сооружений.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о необходимости учета сезонных вариаций резонансных свойств поверхностного грунтового слоя при проектировании различных сооружений, в особенности в районах с климатическими условиями, характеризующимися сменой длительных периодов положительных и отрицательных температур.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р ИСО 14837-1-2007. Вибрация. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Часть 1. Общее руководство. М.: Стандартинформ, 2008. – 39 с.
2. Колесников Ю.И., Федин К.В. Применение пассивного метода стоячих волн в инженерной сейсмике: физическое моделирование и натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С. 83–91.
3. Колесников Ю.И., Федин К.В. Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 3. – С. 5–21.
4. Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – № 2. – С. 153–167.
5. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // Geophysical Prospecting. – 2018. – Vol. 66, No. 2. – P. 342–353.
6. Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1996. – 653 p.
7. Yuen K.-V., Kuok S.-C. Ambient interference in long-term monitoring of buildings // Engineering Structures. – 2010. – Vol. 32, Iss. 8. – P. 2379–2386.

© К. В. Федин, Ю. И. Колесников, Л. Нгомайезве, 2019