

Ю.И. Колесников

доктор технических наук, главный научный сотрудник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

К.В. Федин

кандидат технических наук, научный сотрудник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Л. Нгомайезве

магистрант

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

УДК 550.34.016; 699.84

О влиянии сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов на сейсмобезопасность сооружений

Аннотация: Приведены результаты натурных экспериментов по оценке возможного влияния на сейсмобезопасность сооружений сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов, лежащих в их основании. Собственные частоты десятиэтажного жилого дома и поверхностного грунтового слоя определялись по данным пассивных (шумовых) сейсмоакустических измерений, выполненных в конце января и в конце июня. Результаты экспериментов показали, что в районах с климатическими условиями,

характеризующимися сменой длительных периодов положительных и отрицательных температур, резонансные свойства поверхностного грунтового слоя в течение года могут изменяться в существенно больших пределах, чем свойства построенных на них сооружений. В определенные периоды такие изменения могут приводить к совпадению некоторых 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.

Kolesnikov Yu.I., DSc. (technics), Chief Researcher,

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Fedin K.V., PhD, Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Ngomayezwe L., Postgraduate, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

On the Influence of Seasonal Changes in the Resonant Properties of Surface Soils on Seismic Safety of Structures

Abstract: The results of field experiments to assess the possible influence on seismic safety of structures of seasonal changes in the resonant properties of the underlying subsurface soils are given. The natural frequencies of a ten-story residential building and the surface soil layer were determined from passive (noise) seismic acoustic measurements made at the end of January and the end of June. The results of the experiments showed that in areas with

climatic conditions characterized by alternation of long periods of positive and negative temperatures, the resonance properties of the surface soil layer during the year can vary more significantly than the properties of the structures built on them. At certain periods, such changes can lead to the coincidence of some natural frequencies of the soil layer and the structures standing on it, which ultimately reduces their seismic safety.

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

Введение

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, по крайней мере для наиболее интенсивных мод собственных колебаний, не совпадали с собственными частотами оснований, что позволяет в значительной мере нивелировать возможные резонансные явления при землетрясениях.

Однако собственные частоты уже построенных сооружений могут существенно отличаться от расчетных в силу разных причин – ошибок в расчетах, отступлений от проекта в ходе строительства, замены строительных материалов на их аналоги и др. В ходе эксплуатации также могут происходить изменения собственных частот таких объектов вследствие различных изменений их конструкции, возникновения дефектов, естественного старения и др. [29, 30, 16, 18, 14]. Небольшие изменения собственных частот могут происходить и в течение относительно коротких временных отрезков, например, под влиянием ветра, дождя, температурных колебаний и т.д. [31, 18, 25, 13], а также из-за сезонных изменений климатических условий [24, 32, 12].

Все указанные факторы, влияющие на собственные частоты сооружений, при определенных условиях могут приводить к снижению их сейсмобезопасности. Поэтому при обследовании и мониторинге технического состояния зданий и сооружений, в особенности повышенного уровня ответственности, важная роль отводится экспериментальным методам определения собственных частот и форм колебаний таких объектов.

Для определения этих динамических параметров применяют разные методы. Можно инициировать стоячие волны на частотах собственных колебаний сооружений искусственно, например, вибрационными воздействиями [19, 18, 33], ударами кувалды [21, 27], быстрым снятием нагрузки [28]. Также для этих целей используют записи землетрясений [18, 17] или шумы, возбуждаемые в исследуемых объектах ветром, транспортом, различными механизмами и т.д. [20, 15, 3, 24, 26, 12].

С другой стороны, очевидно, что со временем могут меняться динамические свойства не только самих надземных сооружений, но и их оснований, причинами чего могут быть изменения уровня грунтовых вод, влажности и температуры приповерхностных грунтов и т.д. В особенности это касается криолитозоны и районов, характеризующихся чередованием длительных периодов положительных и отрицательных температур. В таких районах мощность слоя сезонных промерзаний и оттаиваний грунтов может достигать нескольких метров [4]. Изменение состояния приповерхностных грунтов, естественно, должно так или иначе менять их резонансные свойства. Такие сезонные вариации наблюдались нами ранее при оценке резонансных свойств верхней части разреза на территории геофизической обсерватории «Ключи» под Новосибирском [7]. При этом увеличение собственных частот приповерхностного слоя в зимний период относительно летнего достигало 15-20%.

В данной статье на примере относительно недавно построенного в новосибирском Академгородке десятиэтажного жилого здания показано, что сезонные изменения резонансных свойств грунтовых оснований могут оказывать влияние на сейсмобезопасность надземных сооружений вне зависимости от изменения резонансных свойств самих сооружений.

Мотивация к проведению экспериментальных исследований

Десятиэтажный четырехподъездный жилой дом, выбранный в качестве объекта настоящего исследования, расположен по адресу: г. Новосибирск, ул. Разъездная, д. 10 (рис. 1). Кирпичное здание построено на свайном фундаменте и сдано в эксплуатацию в 2011 году. Дом находится в непосредственной близости от железнодорожной станции Сеятель, расположенной в пределах новосибирского Академгородка. В плане дом имеет L-образную форму и состоит из трех однотипных секций, две из которых ориентированы примерно параллельно железнодорожным путям, а третья – перпендикулярно к ним. Расстояние от дома до ближайшего железнодорожного пути составляет примерно 80 м.






-  Жилой дом
-  Гараж
-  Ж/д станция Сеятель

Рисунок 1 — Расположение жилого дома и гаража, в которых проводились наблюдения, по отношению к железнодорожным путям и общий вид жилого дома со стороны железной дороги

Figure 1 — Location of the residential building and the garage in which the observations were made in relation to the railway and general view of the residential building from the side of the railway

Станция «Сеятель» характеризуется довольно интенсивным железнодорожным движением, так как проходящая через нее железная дорога связывает Новосибирск с южными районами Западной Сибири и Казахстаном. Только пассажирских (пригородных и дальнего следования) поездов через эту станцию проходит несколько десятков в сутки.

Интенсивное железнодорожное движение в непосредственной близости от рассматриваемого дома приводит к тому, что он испытывает повышенные в сравнении с большинством других домов данного района вибрационные нагрузки. Хотя все работы по проектированию и возведению данного объекта были, естественно, проведены в соответствии с требованиями строительных норм и правил (СНиП) и согласованы с надзорными органами, некоторые жители, в особенности верхних этажей этого дома, отмечают, что в отдельные периоды вибрация от проходящих составов сопровождается характерными «поскрипываниями» в строительных конструкциях. Причем эти явления носят сезонный характер, а именно, наблюдаются только в зимнее время, преимущественно в январе-феврале.

С учетом того, что, согласно опубликованным данным, сезонные изменения климатических условий могут оказывать влияние на собственные частоты как сооружений [24, 32, 12], так и приповерхностных грунтов [5], было принято решение оценить возможность влияния этих сезонных факторов на реакцию строительных конструкций на внешние вибрации. С этой целью были проведены две серии экспериментов по регистрации сейсмоакустических

шумов как внутри исследуемого здания для определения его собственных частот и форм колебаний, так и вне его – для определения собственных частот приповерхностных грунтов. Одна серия наблюдений проводилась в конце января, а вторая – в конце июня.

Метод исследования

Для исследования собственных частот здания и приповерхностных грунтов в данной работе применялся пассивный (без искусственных источников) метод, основанный на выделении стоячих волн из сейсмоакустических шумов, регистрируемых в ограниченных объектах. Суть метода сводится к накоплению большого числа амплитудных спектров шумовых записей, сделанных в каждой точке наблюдений. В результате накопления на осредненных спектрах появляются регулярные (или квазирегулярные при частотно-зависимых скоростях упругих волн) последовательности пиков на собственных частотах изучаемых объектов, соответствующие семействам стоячих волн разных типов. Этот метод неоднократно применялся нами ранее при физическом моделировании стоячих волн в различных объектах [9, 10, 2, 6, 22], а также был успешно опробован на результатах натурных экспериментов [7, 5, 22, 11].

В описываемой серии экспериментов регистрация сейсмоакустических шумов (микросейсм) 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 использо-

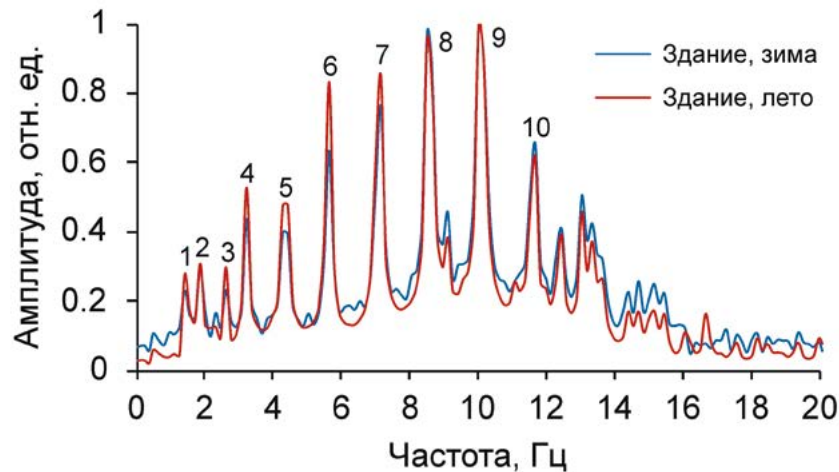


Рисунок 2 — Осредненные по времени и по всем точкам наблюдений нормированные амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в здании в зимний и летний периоды

Figure 2 — Time-averaged over all observation points normalized amplitude spectra of noise recorded in the building in winter and summer periods

вались горизонтальные геофоны GS20DX и одноканальные автономные цифровые регистраторы Texan (RefTek-125A) с частотой дискретизации 1 кГц. Нужно заметить, что чувствительность геофонов GS-20DX на частотах ниже собственной (10 Гц), согласно паспортным данным, резко снижается. Тем не менее, как будет показано ниже, накопление большого числа амплитудных спектров шумовых записей позволяет уверенно выделять стоячие волны даже с существенно меньшими частотами.

При обработке шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью $T \approx 8,2$ с (8192 отсчета), и вычислялись амплитудные спектры этих фрагментов. Такая длительность обрабатываемых временных отрезков обеспечивает достаточную для исследуемого частотного диапазона спектральную разрешающую способность ($\Delta f = 1/T$) на уровне примерно 0,12 Гц. 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 (для сдвиговых колебаний) слоя приповерхностных грунтов, лежащих в его основании.

Поперечные моды собственных колебаний здания

В исследуемом здании регистрация шумов производилась на внутренней стене лестничной клетки второго подъезда, находящегося в двухсекционной части дома, ориентированной вдоль железной дороги. Измерения велись в двух точках каждого этажа, включая цокольный, – непосредственно возле пола лестничной площадки и в средней по высоте точке стены. Таким образом, регистрировались горизонтальные колебания двухсекционной части дома в направлении, перпендикулярном к железнодорожному полотну. Однозначно идентифицировать тип стоячих волн (изгибных, крутильных или более сложных) в таком трехмерном объекте по измерениям 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 зимний и летний периоды. Как можно видеть, на обоих спектрах наблюдается ряд пиков (на рисунке они отмечены номерами от 1 до 10), частоты которых не зависят от времени года, несколько отличаются лишь их амплитуды.

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 вполне закономерно, образуя чередующиеся последовательности узлов и пучностей, причем с ростом частоты число узлов и пучностей возрастает. Кроме того, наблюдается тенденция к возрастанию амплитуд в пучностях на верхних этажах здания по сравнению с нижними.

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. Заметим, что цифры, которыми отмечены спектральные пики на рис. 2, являются их условными порядковыми номерами, но не номерами мод, которые, как отмечено выше, могут иметь разную природу. Различия в соотношении амплитуд разных пиков на двух спектрах связаны, по-видимому, с разным спектральным составом сейсмоакустических шумов, зарегистрированных в зимний и летний периоды.

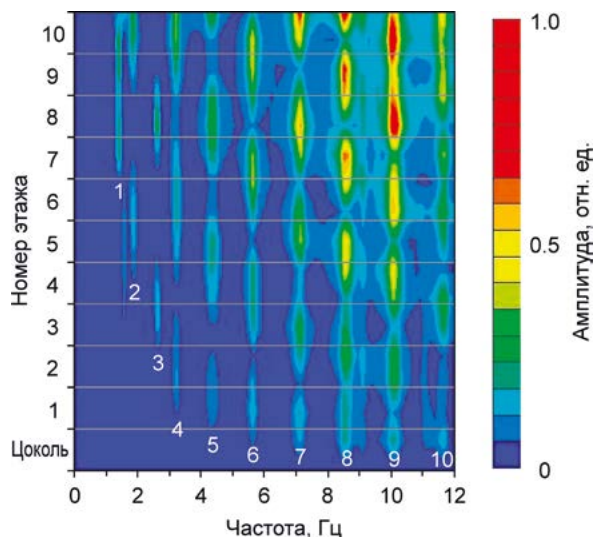


Рисунок 3 — Распределение осредненных по времени амплитудных спектров по высоте здания

Figure 3 — Distribution of time-averaged amplitude spectra over the building height

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. Нужно сказать, что и другими исследователями сезонные колебания собственных частот различных сооружений оценивались в пределах 3-7% [24, 32, 12]. Таким образом, сезонные вариации собственных частот исследуемого здания вряд ли могли оказать существенное влияние на его взаимодействие с грунтами основания этого сооружения.

Резонансные свойства слоя приповерхностных грунтов

Оценка частот сдвиговых горизонтальных собственных колебаний слоя приповерхностных грунтов (в дальнейшем для краткости будем называть их просто собственными частотами грунтового слоя) производилась по амплитудным спектрам микросейсм, зарегистрированных в гараже, расположенном примерно в 60 м от рассматриваемого здания (рис. 1). Для наблюдений использовались два горизонтальных геофона, ориентированных в направлениях север-юг и запад-восток, которые устанавливались в подвале гаража на земляном полу, уровень которого был ниже уровня земной поверхности примерно на 2,5 м. Сразу отметим, что принципиальных различий результатов, полученных по записям двух геофонов, не наблюдалось, поэтому в дальнейшем приведены результаты только для геофона, ориентированного в направлении запад-восток, то есть примерно в перпендикулярном к железнодорожным путям направлении.

Учитывая предыдущий опыт определения резонансных свойств верхней части разреза [5], продолжительность непрерывной записи микросейсм как в зимний, так и в летний периоды здесь была увеличена примерно до недели. В результате накопления нескольких десятков тысяч амплитудных спектров фрагментов полученных записей (длительность каждого фрагмента 8192 отсчета) на осредненных спектрах появились характерные для стоячих волн в приповерхностном слое регулярные пики (рис. 4).

Как известно [23], резонансные частоты грунтового слоя, лежащего на жестких породах, для сдвиговых волн определяются формулой

$$f_n = \frac{(2n-1)V_s}{4h}, \quad (1)$$

где n – номер моды стоячих волн ($n=1,2,3,\dots$), V_s – скорость поперечных волн, h – толщина слоя. Соответственно, интервал между соседними собственными частотами $\Delta f=(f_{n+1}-f_n)$ равен $V_s/2h$, то есть удвоенной частоте нижней моды f_1 .

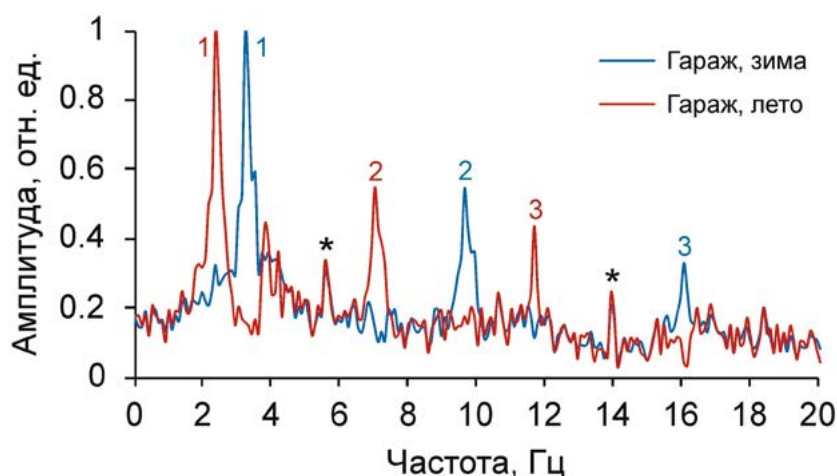


Рисунок 4 — Осредненные по времени и по всем точкам наблюдений нормированные амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в подвале гаража в зимний и летний периоды

Figure 4 — Time-averaged normalized amplitude spectra of noise recorded in the garage basement in winter and summer periods; numerals indicate mode numbers of standing waves

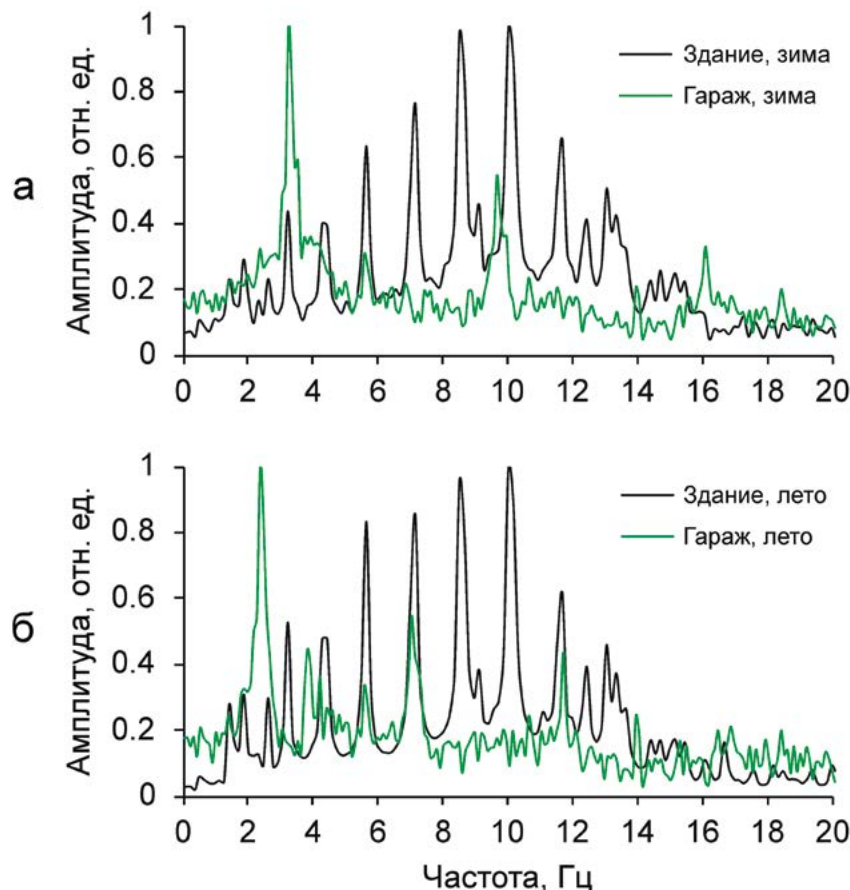


Рисунок 5 — Сравнение нормированных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных в здании и в подвале гаража в зимний (а) и летний (б) периоды

Figure 5 — Comparison of normalized amplitude spectra of noise recorded in the building and in the garage basement in winter (a) and summer (b) periods

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 зимним наблюдениям, равны 3,17 Гц, 9,64 Гц и 16,1 Гц, а по летним – 2,32 Гц, 7,08 Гц и 11,72 Гц.

Таким образом, собственные частоты 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.

Заметим, что на рис. 4 можно выделить и еще несколько относительно небольших пиков (например, отмеченные звездочками пики на частотах 5,62 Гц и 13,92 Гц), частоты которых на двух спектрах совпадают. Предположительно это колебания техногенного происхождения, так как их частоты не только не зависят от сезона, но и не согласуются с формулой (1) для резонансных частот слоя.

Обсуждение результатов наблюдений

Конечно, оценки собственных частот грунтового слоя, полученные по зарегистрированным в подвале гаража микросейсам, могут не отражать в точности резонансных свойств этого слоя под зданием. Отличаться могут и мощность слоя,

тем более измененная непосредственно под этими строениями, и состояние грунтов, и нагрузка на них, и др. Тем не менее, можно констатировать, что при почти не зависящих от времени года частотах поперечных мод собственных колебаний здания наблюдаются значительные сезонные изменения резонансных свойств приповерхностного слоя.

А именно, частоты мод стоячих волн горизонтального сдвига одного порядка, определенные по результатам январских и июньских наблюдений, отличаются на несколько десятков процентов. Абсолютное же изменение частоты, например, 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 собственных колебаний приповерхностного слоя могут совпадать, что может привести к снижению сейсмобезопасности данного сооружения.

Это иллюстрирует рис. 5, на котором осредненные амплитудные спектры записей, зарегистрированных в здании и в гараже, сгруппированы по времени наблюдений. Как можно видеть, в летний период частота наиболее интенсив-

ной низшей моды собственных 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 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.

При этом нужно иметь в виду, что, как уже упоминалось выше, чувствительность использованных при измерениях геофонов резко снижается на частотах ниже 10 Гц (например, на частоте 5 Гц примерно в 4-5 раз). Поэтому амплитуды пиков в низкочастотной части приведенных в данной статье спектров, занижены, причем тем больше, чем ниже их частота. В реальности для обоих спектров наиболее интенсивными являются пики, соответствующие низшим модам стоячих волн.

Известно, что 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, тележками вагонов 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, 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 сочленений, – 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.

Заключение

Проведены эксперименты по изучению сезонных изменений частот поперечных собственных колебаний десятиэтажного здания и горизонтальных сдвиговых собственных колебаний приповерхностного грунтового слоя. Собствен-

ные частоты определялись по данным пассивных (шумовых) измерений, сделанных в конце января и в конце июня. Результаты экспериментов показали, что в климатических условиях, характеризующихся сменой длительных периодов положительных и отрицательных температур, резонансные свойства приповерхностного слоя грунта могут быть подвержены значительным сезонным изменениям. Причем эти изменения можно наблюдать не только на открытой земной поверхности, где происходят сезонные промерзания и оттаивания грунта. В частности, в данной работе сезонные вариации резонансных свойств приповерхностных грунтов изучались по данным измерений микросейсм в подвале отапливаемого гаража.

В то же время, как следует из результатов наблюдений, частоты поперечных собственных колебаний исследованного здания с точностью до спектральной разрешающей способности метода не зависят от времени года. Это приводит к тому, что в определенные периоды частота низшей моды горизонтальных собственных колебаний грунтового слоя может стать равной или достаточно близкой к одной из частот поперечных собственных колебаний здания. В данных экспериментах такое совпадение наблюдалось во время январских наблюдений.

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. Для исследованного дома это проявляется в появлении аномальных эффектов при прохождении поездов по близлежащей железной дороге – «поскрипываний» в строительных конструкциях в зимние месяцы (в январе-феврале).

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

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0009 «Динамический анализ сейсмических данных для построения реалистичных моделей геологической среды на основе математического и физического моделирования».

Acknowledgment

The work was supported by the FNI project No. 0331-2019-0009 "Dynamic analysis of seismic data for building realistic models of the geological environment based on mathematical and physical modeling".

Литература

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. Еманов А.Ф., Каргаполов А.А., Колесников Ю.И., Федин К.В. Диагностика потери устойчивости опор трубопроводов по акусти-

ческим шумам: лабораторный эксперимент // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. № 4. С. 84–90.

3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 3. С. 20–23.

4. Заболотник С.И., Заболотник П.С. Условия сезонного протаивания и промерзания грунтов в Южной Якутии // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII, № 1. С. 23–30.

5. Колесников Ю.И., Федин К.В. Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. 2017. № 3. С. 5–21.

6. Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсам: физическое моделирование // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 89–96.

7. 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.

8. Колесников Ю.И., Федин К.В., Еманов А.Ф. О детальном изучении резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: данные физического моделирования // Технологии сейсморазведки. 2013. № 3. С. 52–63.

9. Колесников Ю.И., Федин К.В., Каргаполов А.А., Еманов А.Ф. О диагностике состояния конструктивных элементов сооружений по шумовому полю (по данным физического моделирования) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 1. С. 3–11.

10. Колесников Ю.И., Федин К.В., Каргаполов А.А., Еманов А.Ф. О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 4. С. 59–67.

11. Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайзев Л. Диагностика основания твердого дорожного покрытия по упругим стоячим волнам // Ин-

женерные изыскания. 2018. Т. XII. № 7–8. С. 84–91.

12. Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 2. С. 153–167.

13. Марченков А.Ю., Капустян Н.К., Смирнов В.Б. Опыт регистрации сейсмического воздействия на высотное здание МГУ // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 3. С. 31–42.

14. Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010 // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 33–39.

15. Brownjohn J.M.W. Ambient vibration studies for system identification of tall buildings // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2003. Vol. 32. Iss. 1. P. 71–95.

16. Carden E.P., Fanning P. Vibration based condition monitoring: a review // Structural Health Monitoring. 2004. Vol. 3. Iss. 4. P. 355–377.

17. Cheng M.H., Kohler M.D., Heaton T.H. Prediction of Wave Propagation in Buildings Using Data from a Single Seismometer // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 105. No. 1. P. 107–119.

18. Clinton J.F., Bradford S.C., Heaton T.H., Favela J. The observed wander of the natural frequencies in a structure // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. Vol. 96. No. 1. P. 237–257.

19. Galambos T.V., Mayes R.C. Lessons from dynamic tests of an eleven storey building // Engineering Structures. 1979. Vol. 1. Iss. 5. P. 264–273.

20. Ivanović S.S., Trifunac M.D., Todorovska M.I. Ambient vibration tests of structures – A review // ISET Journal of Earthquake Technology. 2000. Paper No. 407. Vol. 37. No. 4. P. 165–197.

21. Khoo L.M., Mantena P.R., Jadhav P. Structural damage assessment using vibration modal analysis // Structural Health Monitoring. 2004. Vol. 3. Iss. 2. P. 177–194.

22. 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.

23. Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1996. 653 p.

24. Liu C., DeWolf J.T. Effect of temperature on modal variability of a curved concrete bridge under ambient loads // Journal of Structural Engineering. 2007. Vol. 133. Iss. 12. P. 1742–1751.

25. Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhães F., Cunha Á. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response // Engineering Structures. 2014. Vol. 59. P. 80–94.

26. Michel C., Guéguen P., Bard P.-Y. Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: An aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2008. Vol. 28. Iss. 8. P. 593–604.

27. Park S.A., Choi J.S., Min K.W. Dynamic characteristics for traditional wooden structure in Korea by using impact hammer test // Procedia Engineering. 2011. Vol. 14. P. 477–484.

28. Robson B.N., Harik I.E. Pullback testing of seismically isolated P/C I-girder bridge // Journal of Structural Engineering. 1998. Vol. 124. Iss. 8. P. 930–937.

29. Salawu O.S., Williams C. Bridge assessment using forced-vibration testing // Journal of Structural Engineering. 1995. Vol. 121, Iss. 2. P. 161–173.

30. Salawu O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review // Engineering Structures. 1997. Vol. 19. No. 9. P. 718–723.

31. Sohn H., Dzwonczyk M., Straser E.G., Kiremidjian A.S., Law K.H., Meng T. An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1999. Vol. 28. Iss. 8. P. 879–897.

32. Yuen K.-V., Kuok S.-C. Ambient interference in long-term monitoring of buildings // Engineering Structures. 2010. Vol. 32, Iss. 8. P. 2379–2386.

33. Zwolski J., Bien J. Modal analysis of bridge structures by means of forced vibration tests // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. Vol. 17. Iss. 4. P. 590–599.

References

1. GOST R ISO 14837-1-2007. Vibratsiya. Shum i vibratsiya, sozdavaemye dvizheniem rel'sovogo transporta. Chast' 1. Obshhee rukovodstvo. M.: Standartinform, 2008. 39 s.

2. Emanov A.F., Kargaplov A.A., Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Diagnostirovanie poteri ustojchivosti opor truboprovodov po

akusticheskim shumam: laboratornyj jeksperiment // Vestnik NGU. Seriya: Matematika, mehanika, informatika. 2013. № 4. S. 84–90.

3. Emanov A.F., Seleznev V.S., Bah A.A. Kogerentnoe vosstanovlenie polej stoyachih voln kak osnova detal'nogo sejsmologicheskogo obsledovaniya inzhenernyh sooruzhenij // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost'

sooruzhenij. 2007. № 3. S. 20–23.

4. Zabolotnik S.I., Zabolotnik P.S. Usloviya sezonnogo protaivaniya i promerzaniya gruntov v Yuzhnoj Yakutii // Kriosfera Zemli. 2014. T. XIII. № 1. S. 23–30.

5. Kolesnikov Yu. I., Fedin K.V. Obnaruzhenie podzemnyh pustot po mikrosejsmam: fizicheskoe modelirovanie // Tehnologii sejsmorazvedki.

2015. № 4. S. 89–96.
6. Kolesnikov Yu. I., Fedin K.V. *Primenenie passivnogo metoda stoyachih voln v inzhenernoj seismike: fizicheskoe modelirovanie i naturnyj jeksperiment // Tehnologii sejsmorazvedki. 2016. № 2. S. 83–91.*
7. Kolesnikov Yu. I., Fedin K.V. *Pryamoe opredelenie rezonansnyh svoystv verhnej chasti razreza po mikrosejsmam: naturnyj jeksperiment // Tehnologii sejsmorazvedki. 2017. № 3. S. 5–21.*
8. Kolesnikov Yu. I., Fedin K.V., Emanov A.F. *O detal'nom izuchenii rezonansnyh svoystv verhnej chasti razreza: dannye fizicheskogo modelirovaniya // Tehnologii sejsmorazvedki. 2013. № 3. S. 52–63.*
9. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Kargapolov A.A., Emanov A.F. *O diagnostike sostoyaniya konstruktivnyh jelementov sooruzhenij po shumovomu polyu (po dannym fizicheskogo modelirovaniya) // Fiziko-tehnicheskie problem razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2012. № 1. S. 3–11.*
10. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Kargapolov A.A., Emanov A.F. *O diagnostirovanii poteri ustojchivosti opor truboprovodov po akusticheskim shumam // Fiziko-tehnicheskie problem razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2012. № 4. S. 59–67.*
11. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Ngomajezve L. *Diagnostika osnovaniya tvjordogo dorozhnogo pokrytiya po uprugim stoyachim volnam // Inzhenernye izyskaniya. 2018. T. XII. № 7–8. S. 84–91.*
12. Korepanov V.V., Cvetkov R.V. *Sezonnye izmeneniya sobstvennyh chastot kolebanij zdaniya na svajnom fundamente // Vestnik PNIPU. Mehanika. 2014. № 2. S. 153–167.*
13. Marchenkov A.Yu., Kapustyan N.K., Smirnov V.B. *Opyt registracii sejsmicheskogo vozdejstviya na vysotnoe zdanie MGU // Geofizicheskie issledovaniya. 2015. T. 16. № 3. S. 31–42.*
14. Savin S.N., Demishin S.V., Sitnikov I.V. *Monitoring unikal'nyh ob'ektov s ispol'zovaniem dinamicheskikh parametrov po GOST R 53778-2010 // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2011. № 7. S. 33–39.*
15. Brownjohn J.M.W. *Ambient vibration studies for system identification of tall buildings // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2003. Vol. 32. Iss. 1. P. 71–95.*
16. Carden E.P., Fanning P. *Vibration based condition monitoring: a review // Structural Health Monitoring. 2004. Vol. 3. Iss. 4. P. 355–377.*
17. Cheng M.H., Kohler M.D., Heaton T.H. *Prediction of Wave Propagation in Buildings Using Data from a Single Seismometer // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 105. No. 1. P. 107–119.*
18. Clinton J.F., Bradford S.C., Heaton T.H., Favela J. *The observed wander of the natural frequencies in a structure // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. Vol. 96. No. 1. P. 237–257.*
19. Galambos T.V., Mayes R.C. *Lessons from dynamic tests of an eleven storey building // Engineering Structures. 1979. Vol. 1. Iss. 5. P. 264–273.*
20. Ivanović S.S., Trifunac M.D., Todorovska M.I. *Ambient vibration tests of structures – A review // ISET Journal of Earthquake Technology. 2000. Paper No. 407. Vol. 37, No.4. P. 165–197.*
21. Khoo L.M., Mantena P.R., Jadhav P. *Structural damage assessment using vibration modal analysis // Structural Health Monitoring. 2004. Vol. 3, Iss. 2. P. 177–194.*
22. 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.*
23. Kramer S.L. *Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1996. 653 p.*
24. Liu C., DeWolf J.T. *Effect of temperature on modal variability of a curved concrete bridge under ambient loads // Journal of Structural Engineering. 2007. Vol. 133. Iss. 12. P. 1742–1751.*
25. Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhães F., Cunha Á. *Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response // Engineering Structures. 2014. Vol. 59. P. 80–94.*
26. Michel C., Guéguen P., Bard P.-Y. *Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: An aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2008. Vol. 28. Iss. 8. P. 593–604.*
27. Park S.A., Choi J.S., Min K.W. *Dynamic characteristics for traditional wooden structure in Korea by using impact hammer test // Procedia Engineering. 2011. Vol. 14. P. 477–484.*
28. Robson B.N., Harik I.E. *Pullback testing of seismically isolated P/C/I-girder bridge // Journal of Structural Engineering. 1998. Vol. 124. Iss. 8. P. 930–937.*
29. Salawu O.S., Williams C. *Bridge assessment using forced-vibration testing // Journal of Structural Engineering. 1995. Vol. 121. Iss. 2. P. 161–173.*
30. Salawu O.S. *Detection of structural damage through changes in frequency: a review // Engineering Structures. 1997. Vol. 19. No. 9. P. 718–723.*
31. Sohn H., Dzwonczyk M., Straser E.G., Kiremidjian A.S., Law K.H., Meng T. *An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1999. Vol. 28. Iss. 8. P. 879–897.*
32. Yuen K.-V., Kuok S.-C. *Ambient interference in long-term monitoring of buildings // Engineering Structures. 2010. Vol. 32. Iss. 8. P. 2379–2386.*
33. Zwolski J., Bien J. *Modal analysis of bridge structures by means of forced vibration tests // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. Vol. 17. Iss. 4. P. 590–599.*

Для цитирования: Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайезве Л. О влиянии сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов на сейсмобезопасность сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 3. С. 56–64.

For citation: Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Ngomajezve L. *On the Influence of Seasonal Changes in the Resonant Properties of Surface Soils on Seismic Safety of Structures. Seismostoiokoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety], 2019, no. 3, pp. 56–64. (In Russian).*