

УДК 553.34

*Н.К. КАПУСТЯН, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли РАН (Москва);  
Г.Н. АНТОНОВСКАЯ, И.М. БАСАКИНА, кандидаты техн. наук, И.В. ПУДОВА, физик,  
Институт экологических проблем Севера УрО РАН (Архангельск)*

## Сейсмометрические методы определения состояния сооружений и допустимых нагрузок от вибровоздействий

*Представлены результаты применения сейсмометрических методов при оценке состояния южной стены (прясла) Спасо-Прилуцкого монастыря (г. Вологда), расположенного в непосредственной близости от железнодорожной линии. Определена вибронагрузка на сооружение от воздействия проходящего поезда.*

**Ключевые слова:** техногенные вибрации, сейсмометрические методы, акселерограмма, расчетная модель, скоростная модель грунтов основания.

Развитие экономики страны зависит от скорости и объемов перевозок. Любой вид транспорта является источником механических колебаний, которые через грунтовую среду передаются на расположенные вблизи магистралей сооружения, вызывая их вибрацию. Проблема определения уровня транспортных вибраций и их воздействий на техническое состояние зданий является актуальной, при этом важна индивидуальная ситуация. Отклик среды на вибрационные воздействия может усиливаться или снижаться в зависимости от физико-механических свойств и строения грунтов, от состояния фундамента и его сочленения со зданием, от несущей способности элементов конструкции и других факторов.

В настоящее время для оценки внешних воздействий широко применяются методы компьютерного моделирования путем приложения соответствующих нагрузок (стати-

ческих или динамических) к конечно-элементным моделям сооружения и грунтов [1, 2]. Преобразования внешних воздействий при переходе из грунта в тело сооружения требуют задания ряда коэффициентов, описывающих физико-механические свойства самого сооружения, зоны контакта сооружения с грунтами основания. В ряде случаев значения коэффициентов могут изменяться в широком диапазоне, что требует подбора величин, на основе дополнительных натурных определений в конкретной задаче. Решение о необходимости установки виброзащиты должно подтверждаться как теоретическим расчетом, так и экспериментальными измерениями уровня воздействий, что является индивидуальным для каждого сооружения или памятника архитектуры.

В настоящее время при решении проблемы диагностики состояния зданий и сооружений все большее внимание



**Рис. 1.** Вид Спасо-Прилуцкого Димитриев монастыря со стороны железнодорожного полотна



**Рис. 2.** Южная стена монастыря с внутренней стороны

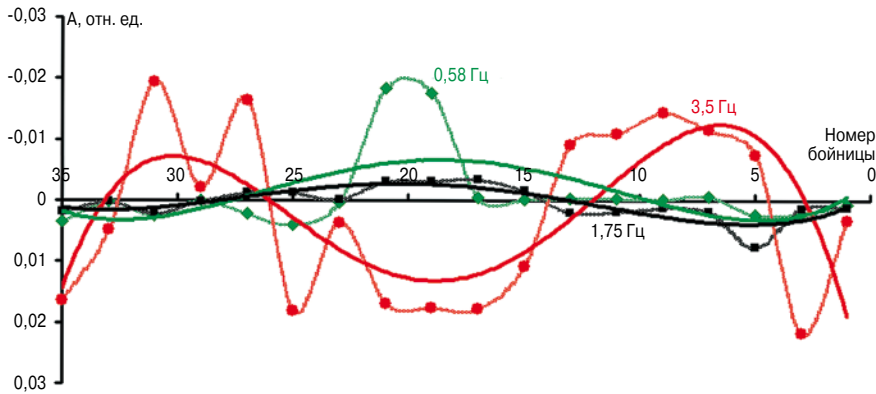


Рис. 3. Экспериментальные формы собственных колебаний на частотах 0,58, 1,75 и 3,5 Гц. Линии с точками – профиль формы по точкам наблюдений, сплошная – полиномиальное сглаживание. Перемещения показаны в зависимости от номера бойницы, 0 – башня у реки

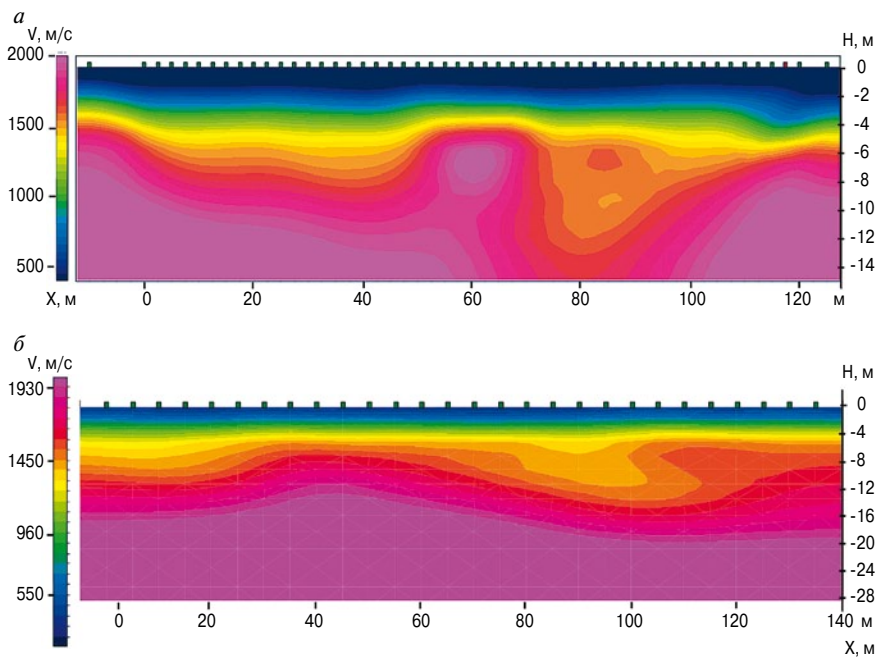


Рис. 4. Вертикальный скоростной разрез среды по профилю, расположенному с внешней стороны стены (а); с внутренней стороны стены (б)

уделяется сейсмометрическим обследованиям [1]. Представляемые в данной работе исследования включают: сейсмометрические наблюдения динамики обследуемого объекта (построение основных форм собственных колебаний), обследования грунтов оснований, создание расчетной схемы по результатам инструментальных наблюдений, проведение записи акселерограмм техногенных воздействий и отклика сооружения, расчет отклика модели на вибровоздействие. Анализ динамики сооружения необходим для оценки параметров, характеризующих движение точек объекта при собственных колебаниях или вследствие воздействий (динамических характеристик). Их определение является отображением состояния сооружения и необходимо для создания методом подпора расчетной модели, наиболее приближенной к действительности. Расчетная модель позволяет оценить вклад тех или иных воздействий на сооружение, в нашем примере вибраций от железнодорожного транспорта, а также разработать те или иные ретраивационные мероприятия (Сотников С.Н., Симагин В.Г.,

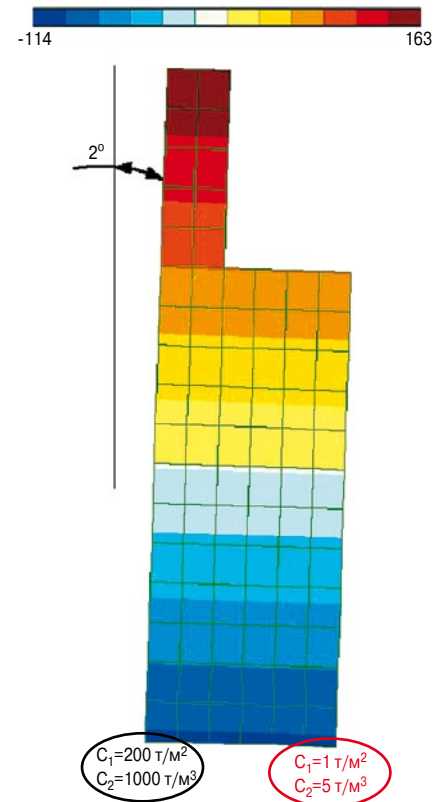


Рис. 5. Решение статической задачи перемещения стены при ослабленном грунте

Вершинин В.П. Проектирование и возведение фундаментов вблизи существующих сооружений: Опыт строительства в условиях Северо-Запада СССР / Под ред. С.Н. Сотникова. М.: Стройиздат, 1986. 96 с.).

Объект исследований, который иллюстрирует данную проблему, – стена Спасо-Прилуцкого Димитриева монастыря [3].

Цель работ: выяснение причин разрушения южной стены монастыря и оценка вклада вибрации от транспорта в ее состоянии.

Спасо-Прилуцкий действующий мужской монастырь расположен на окраине Вологды (рис. 1). Он представляет собой красивейший архитектурный ансамбль Древней Руси (основан в 1371 г.). Южное прясло (стена) монастыря имеет сильный крен в сторону внутреннего двора и серию крупных трещин, расположенных близко к башням (рис. 2). Предполагается, что стену поддерживают пять существующих контрфорсов, находящихся в неудовлетворительном состоянии. На расстоянии порядка 170 м от прясла проходит магистраль Северной железной дороги. Вдоль западной стены монастыря протекает река Вологда. Вибрации от проходящих пассажирских и товарных поездов ощутимы даже без специальных средств измерений, особенно с южной стороны монастыря. Возможно, они усиливаются вибрациями конструкции железнодорожного моста через р. Вологду.

Инженерно-сейсмометрические обследования. Измерения собственных колебаний стены и вибрационных воздей-

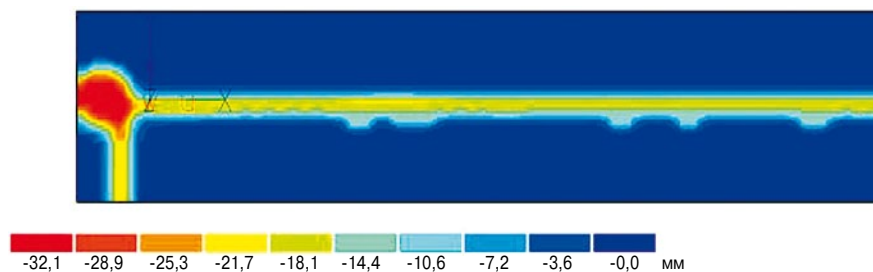


Рис. 6. Поле деформации основания (расчет)

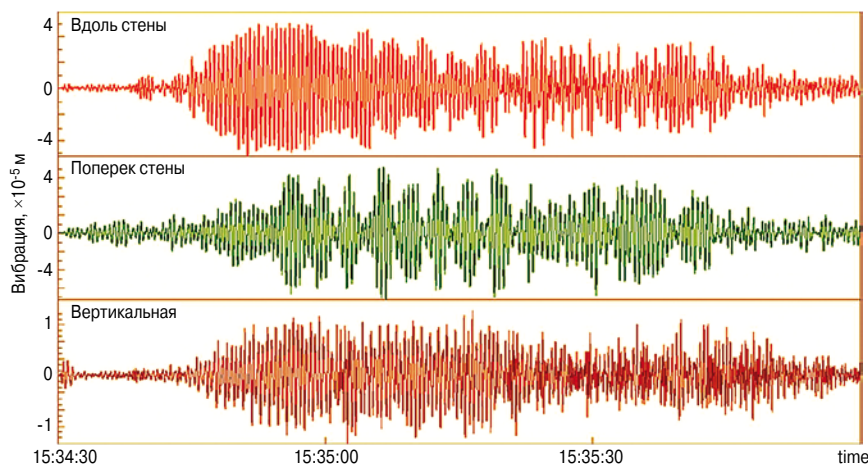


Рис. 8. Акселерограмма вибрации от поезда по компонентам: вверху – вдоль стены; в середине – поперек стены; внизу – вертикальная

ствий от проходящих поездов проводились с использованием акселерометров и велосиметров. Наблюдения велись: на доступном верхнем уровне стены (галерее) монастыря, включая заход в башни; на нижних бойницах и на грунте по компонентам X, Y, Z [3]. Длина прясла составляет 140 м; датчики устанавливались на галерее практически у каждой бойницы, шаг 3,5 м.

По полученным записям микросейсм, согласно методике анализа собственных колебаний [3, 4], в каждой точке наблюдений для каждой из частот определены амплитуды и фазы колебаний и построены экспериментальные профили форм колебаний (рис. 3). Анализ форм собственных колебаний показывает следующее. Наибольшие перемещения фиксируются на частоте 3,5 Гц; наблюдается более изрезанный вид формы в левой части графика (бойницы 20–35), чем в правой (1–19 бойницы), что говорит о большей целостности правой части прясла. «Раскрепление» прясла от башен не доходит до основания стены, так как в точках у башен (1-я и 35-я бойницы) для первых форм перемещения близки к нулевым, что также соответствует видимым трещинам. На первой наблюдаемой форме – частота 0,58 Гц (зеленая кривая на рис. 3), максимум амплитуд собственных колебаний соотносится с ослаблением конструкции большими воротами в стене (заложены в настоящее время кирпичом). Данные профили форм являются исходными для выбора модели стены из совокупности расчетных моделей, наиболее полно соответствующей эксперименту.

Для обследования грунтов основания стены выполнены сейсморазведочные работы методом преломленных волн. Обработка сейсмического материала проведена в програм-

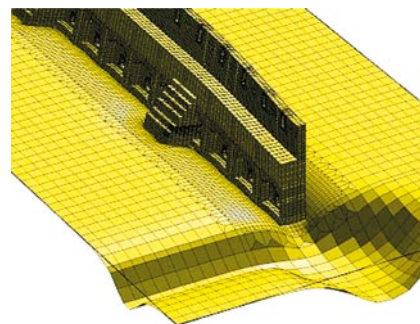


Рис. 7. Деформация основания в районе башни, статическая задача

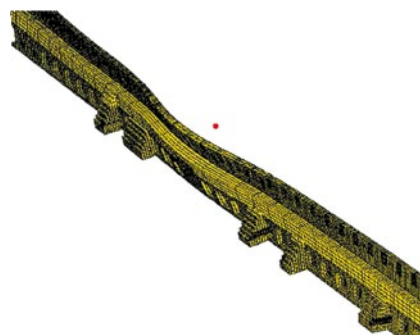


Рис. 9. Динамическая картина перемещений при воздействии вибраций от поезда (без учета собственного веса стены)

мах RadExPro и ZondST2D, получены скоростные разрезы для каждой из линий пройденных профилей. Результаты представлены скоростными вертикальными срезами среды по профилям с внешней и внутренней сторон стены монастыря (рис. 4, 5).

Первая преломляющая граница вдоль внешней стороны стены имеет выраженный наклон к реке и отделяет техногенный слой (скорости до 500 м/с) от супесей. Под супесями предполагаем глинистые грунты: отложения суглинка (зелено-голубой цвет на рис. 4) с неравномерными зонами отложений глин (скорости от 1500 м/с). Глинистые грунты имеют тенденцию вспучивания при промерзании, что предположительно и вызвало деформацию стены. Предполагаем, что выделенная зона (на интервале 70–100 м по профилю) протягивается вдоль всего внутреннего двора к трапезной, где зафиксировано сильное вспучивание полов в кухонном зале и складском подвале. Параметры скоростных характеристик грунтов основания использованы в расчетной модели закрепления прясла в грунте.

**Подбор расчетной модели.** Подбор характеристик основания в модели рассматривается совместно с решением статической задачи, что позволяет оценить поля напряжений в теле объекта. Основной нагрузкой является вес сооружения. Мерой «правильности» подбора расчетной модели является совпадение значений собственных частот – расчетных и полученных при наблюдении, а также «профилей» перемещений точек тела при его собственных колебаниях. Расчет динамической задачи с приложением вибрационных воздействий показывает, какие величины напряжений добавляют эти воздействия к имеющимся статическим. Суммарное напряжение сравнивается с расчетным

сопротивлением материала, тем самым оцениваются вибрационные воздействия.

Для решения статической задачи для упрощенной модели прясла смоделирована ситуация, приведшая прясло в современное состояние. На рис. 5 показан разрез стены и поля перемещений, полученные в результате расчета. Для моделирования ситуации с внешней стороны стены задавались относительно плотные грунты ( $C_1=200 \text{ т/м}^2$ ,  $C_2=1000 \text{ т/м}^2$ ), а внутри – очень слабые, например обводненные ( $C_1=1 \text{ т/м}^2$ ,  $C_2=5 \text{ т/м}^2$ ). Решение статической задачи дает правдоподобную картину: стена наклонилась в «нужном» направлении, причем на достаточно большой градус ( $2^\circ$ ). Кроме того, картина тангенциальных напряжений (нижняя часть рис. 5) объясняет возникновение трещин вблизи башен, наблюдаемых сейчас.

В результате расчетов статической задачи для более детальной модели с учетом башен были получены поля деформации основания (рис. 6) и пространственная картина деформации (рис. 7). В расчет заложена единая модель грунта для всего основания со следующими характеристиками: осредненный модуль упругости  $E=17 \text{ МПа}$  и коэффициент Пуассона грунта  $\nu=0,32$ . В качестве основания в расчетной модели выбрано упругое основание по Пастернаку, характеризующееся двумя коэффициентами постели (податливость основания по вертикали и по горизонтали).

$$C_1 = \frac{0,138 \cdot E}{1 - \nu^2} = 2,61 \text{ МПа};$$

$$C_2 = 2 \cdot C_1 = 5,23 \text{ МПа};$$

Анализ решения статической задачи показывает, что причину возникновения трещин в стене следует искать в недостаточной несущей способности фундаментов сооружения. При разливе реки уровень воды может значительно подниматься, что непредсказуемо скажется на физико-механических характеристиках грунтов и приведет к ослаблению фундамента.

Рассмотрим деформацию стены от динамического воздействия с учетом реальной акселерограммы движения поезда задаваемую в расчетную модель (рис. 8). Наиболее опасное направление динамического воздействия – вдоль оси  $Y$  (поперек стены). Рассчитанные нагрузки от воздействия проходящего поезда оказались достаточно малыми, максимальное перемещение  $10 \text{ мкм}$  ( $10^{-5} \text{ м}$ ) в центре прясла. На рис. 9 приведены перемещения, полученные в расчете на стене, порядок усилий составляет  $10^{-2}$ – $10^{-3} \text{ Н/м}^2$ , что значительно меньше нагрузок от собственного веса конструкций и временных нагрузок. Из этого следует, что вибрации от поезда не могут быть основной причиной разрушения прясла.

**Выводы и перспективы практического использования.** Конструкции прясла находятся в неудовлетворительном состоянии и требуют ремонта и реставрации. Основная причина развития трещин, отклонения от вертикали и изменения линейности по горизонтали определяется взаимодействием стены с грунтами основания. В связи с этим требуется обследование фундамента и его укрепление.

Вибрации от железнодорожного транспорта в данном случае не оказывают воздействия, способного приводить к разрушению прясла даже на длительном интервале времени воздействия. Установка виброзащиты не требуется.

Рекомендуется провести мероприятия по укреплению грунтов основания комплексом технологических (искусственное усиление) и гидрогеологических работ.

Таким образом, использование комплекса инженерно-сейсмометрических методик для оценки состояния зданий и сооружений позволяет получить важные практические результаты.

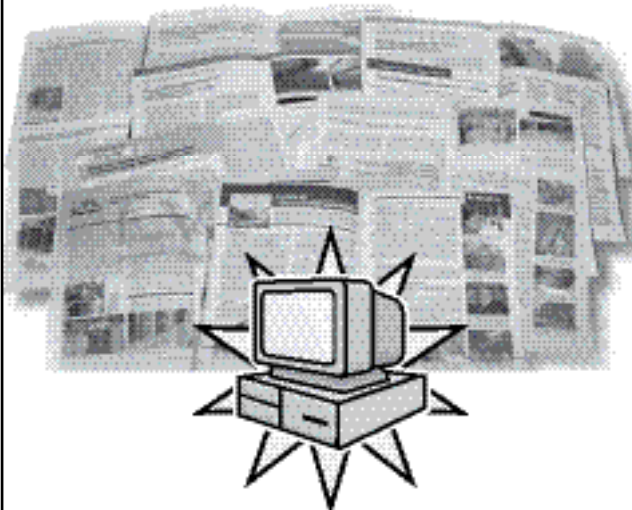
Авторы выражают благодарность А.Н.Климову и В.А.Глотову за оказанную помощь при составлении моделей и выполнении расчетов.

*Работа выполнена при частичной поддержке проекта инициативных фундаментальных исследований УрО РАН № 12-У-5-1006.*

#### Список литературы

1. Сейсмологические исследования в арктических и приарктических регионах / Под ред. чл.-корр. РАН Ф.Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 244 с.
2. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв. ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: СО РАН, филиал «Гео», 2004. 387 с.
3. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Глотов В.А. Комплекс инженерно-сейсмометрических методик для оценки состояния зданий и сооружений // Наука и безопасность. 2012. № 5. С. 40–61.
4. Патент РФ 2365896. Способ определения физических параметров здания и/или сооружения // Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, Е.В. Шахова, И.М. Басакина, А.А. Янович. Опубл. 27.08.2009. Бюл. № 24.

## Подписка на электронную версию



Актуальная информация для всех работников  
строительного комплекса

СТРОИТЕЛЬСТВО

<http://ejournal.rifsm.ru/>