

Иллюстрации к статье

С.А. Татаркина, М.А. Шашкина, С.И. Низовцева, А.А. Курничева, П.Н. Шкатова

«ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МИКРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ, МОНИТОРИНГА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ В ОСОБЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ»

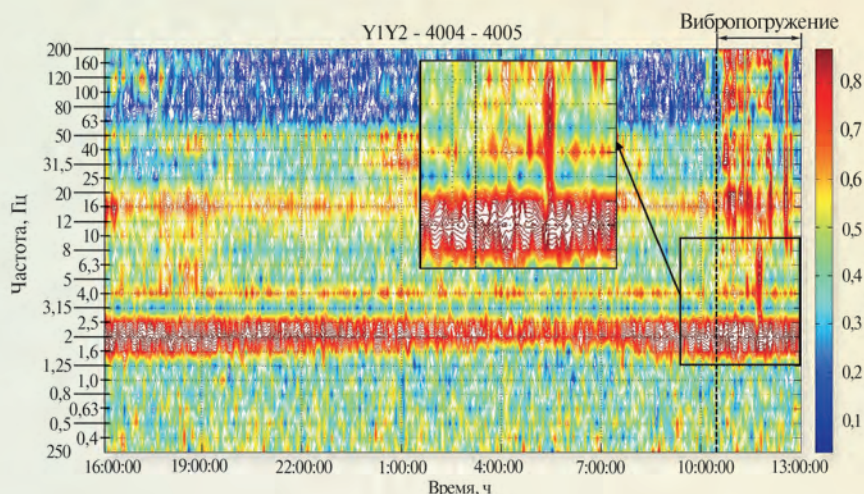


Рис. 4. Спектр когерентности: Y-компонента; сейсморегистраторы 4004 – 4005

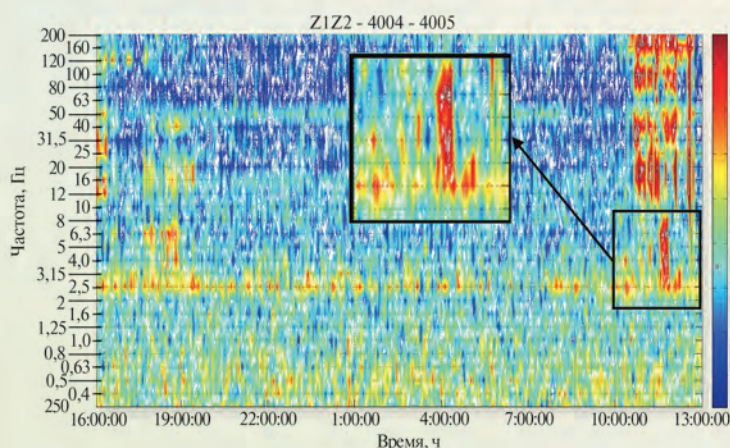


Рис. 5. Спектр когерентности: Z-компонента; сейсморегистраторы 4004 – 4005

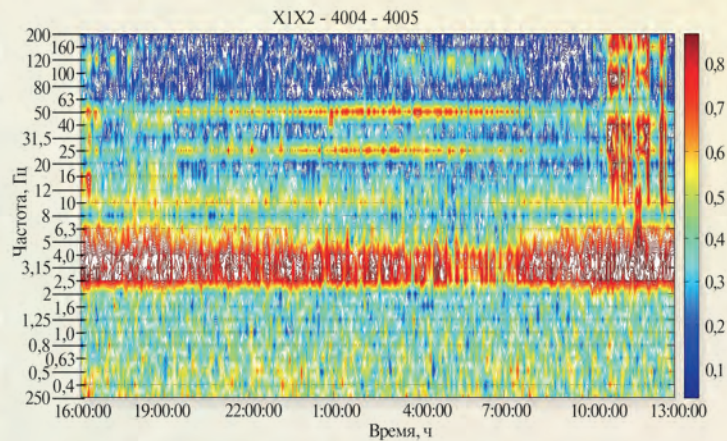


Рис. 6. Спектр когерентности: X-компонента; сейсморегистраторы 4004 – 4005

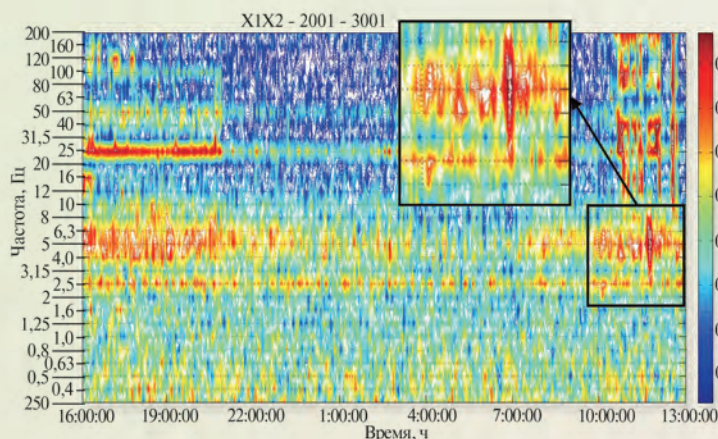


Рис. 7. Спектр когерентности: X-компонента; сейсморегистраторы 2001 – 3001

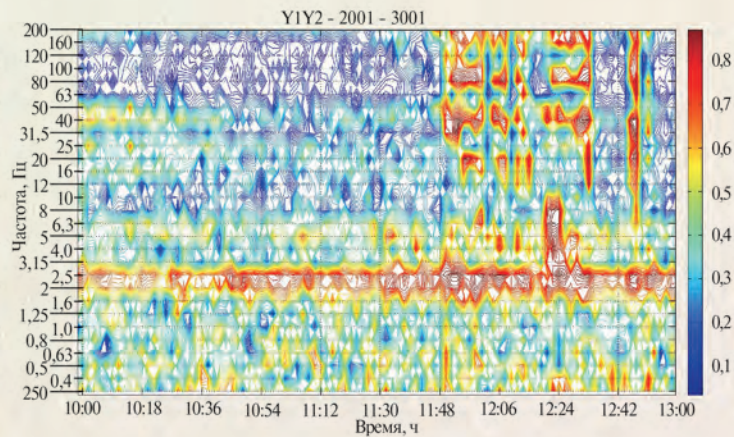


Рис. 8. Спектр когерентности: Y-компонента; датчики 2001 – 3001 (увеличенный)

**С.А. Татаркин, М.А. Шашкин, С.И. Низовцев,  
А.А. Кирпичев, П.Н. Шкатов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МИКРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ, МОНИТОРИНГА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ В ОСОБЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ\***

### **Аннотация**

Описываются экспериментальные результаты применения программно-аппаратного комплекса «Геореконструкция – ГлобалТест», использующего обработку сигналов «просвечивания» объектов микросейсмами для обследования зданий и мониторинга по ГОСТ 31937-2011 при помощи динамических параметров.

**Ключевые слова:** нелинейные свойства грунта, микросейсмы, параметрический резонанс, динамические параметры, сейсморегистраторы.

### **Введение**

Инструментальное обследование зданий и мониторинг их технического состояния при производстве геотехнических работ вблизи от них по ТСН-50-302-2004 и ГОСТ 31937-2011 имеют ряд недостатков. Это приводит к субъективизму в оценке и противоречиям между жителями, заказчиком работ и исполнителем. Что касается мониторинга состояния зданий, то, как показала практика в Санкт-Петербурге, при неучете критериев степени разрушения зданий (снижения их жесткости) в процессе производства работ участились случаи аварийных ситуаций. Так, например, оценка категории зданий производится по СНиПам, позволяющим оценивать качественные характеристики дефектов. Часто эти дефекты являются невидимыми (трещины в фундаменте, трещины под слоем новой штукатурки, под облицовкой фасадов керамической плиткой, трещины внутри и т. д.). В ВСН-490-87 при мониторинге измеряются среднеквадратичные значения ускорений, в то время как в ГОСТе необходимо измерять пиковые (мгновенные) значения, кото-

рые приводят к разрушению структурных связей грунта. Кроме того, они не учитывают частотную зависимость, что рекомендуется в указанном ГОСТе. В самом ГОСТе не приведены критерии опасности разрушения (разуплотнения грунта) и отсутствуют критерии оценки категории зданий при обследовании и мониторинге. Нет критериев изменения форм мод и критериев декрементов затуханий, определяющих «прозрачный» характер физических явлений при разрушении грунта. Негативными примерами неучета особых характеристик грунтов в Санкт-Петербурге являются аварийная ситуация по Иностранному переулку, д. 2; по улице Мира, д. 35; авария метро на пл. Мужества, д. 105 по Фонтанке; здание Биржи; авария коллектора по пр. Наставников у д. 26; предаварийная ситуация д. 3 по Свердловской наб. (бизнес-центр «Феникс») и др. При этом в процессе работ производился мониторинг по ВСН-490 и ТСН 50-3002-2004.

Контрольная проверка с выяснением причин этих аварий и сильных повреждений зданий фирмой «ПИ Геореконструкция» показала, что геологическая ситуация грунта основания соответ-

---

\* Рисунки № 4-8 находятся на 2-й полосе обложки, а рисунки № 9-12, 14 – на 3-й полосе обложки нашего журнала.



ствовала приразломной зоне (вблизи реки Невы, ее притоков, каналов) или местам погребенных долин. Для этих условий характерны слабые водонасыщенные пески с остатками торфа и растительности. Эти грунты особо динамически неустойчивы (даже только при длительном воздействии транспорта). В связи с этим возникла необходимость коррекции ТСН при мониторинге в таких аномальных геологических условиях. На основе экспериментальных исследований с помощью программно-аппаратного комплекса «Геореконструкция – ГлобалТест» были проведены исследования нелинейных свойств грунтов в Санкт-Петербурге.

### **Физико-математические модели распространения сейсмоакустической энергии волн в слоистых средах сооружений «грунт основания – надземная часть»**

В мировой практике многочисленные исследования слоистых сред (включая грунты) при распространении энергии показывают, что существуют три вида моделей, а именно модовая, лучевая и метод мнимых источников.

В ГОСТ 31937-2011 применяется модовая (волновая) модель, основанная на гипергеометрических (балочных) функциях акад. А.Н. Крылова. Эта модель затрудняет интерпретацию результатов для малоэтажных кирпичных зданий в Санкт-Петербурге ввиду особенностей их конструкций. В то же время в стандарте предлагается использовать передаточную (частотно-зависимую) функцию энергии прохода через все сооружение «грунт – надземная часть».

Указанную функцию можно представить в виде лучевой модели с дифракционными добавками (что тоже является волновой моделью). Известно, что амплитуда колебаний при проходе сооружения увеличивается с этажом. Это обусловлено эффектами многолучевости сигналов микросейсмов. Учитывая разность скоростей волн в верхней части геологического разреза (до 30 м по глубине) и резкое увеличение скорости при проходе через надземную часть здания в этой сложной многослойной и многорезонансной среде, сооружения можно рассматривать как волновод с неоднородностями по трассе. При этом неоднородности по трассе распространения могут быть перекрытиями (в частности для кирпичных зданий старой постройки) из другого мате-

риала (либо из железобетона, либо в виде деревянных балок). При таких условиях распространения, как волновод, при многолучевом характере процесса указанную передаточную функцию можно представить как нелинейную характеристику фокусировки лучей. Эти характеристики хорошо известны в акустике и оптике и имеют «прозрачную» физическую интерпретацию. Фактор фокусировки лучей, его амплитуда приближенно описываются выражением

$$a_f \approx kr\Delta\theta^2 \cdot \frac{\cos\gamma}{4},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны;  $r$  – расстояние от точки наблюдения до фокуса;  $\gamma$  – угол наблюдения (точка измерений);  $\theta$  – угол прихода лучей. Фокальная область представляет собой узкую полосу аномальных амплитуд, возрастающих по мере увеличения этажей.

Эти параметры характеризуют известные физические явления: простые и параметрические резонансы, рассеянную и поглощенную компоненты, связанные с деформацией грунта и его динамической устойчивостью, частотную модуляцию дифракционных волн при антиволноводе по трассе и др., а также известные законы в радиофизике, сейсмоакустике и колебаниях сложных механических контуров [1], [2].

### **Физические предпосылки применения нелинейных микродинамических свойств грунта для слежения за процессом разрушения его структуры связей**

Грунт оснований зданий, сооружений как сложная, многослойная и многофазная среда обладает целым набором свойств. Часть этих свойств описывается традиционными геологическими методами, которые используются в расчетах в качестве исходных данных. При этом такие нелинейные свойства грунтов, как теплофизические, – их тепловое расширение, термоупругие потери энергии при проходе через грунт, теплопроводность, проницаемость (водонасыщенность, пористость и связанная с ней дисперсия скорости, ее частотная зависимость) – не учитываются.

Математическое описание свойств грунта в таком случае (напряжения и деформации) описывается уже не законом Гука, а законом Бюргера либо обобщенным законом Гука и квадратичными, кубическими и более высоких поряд-

ков коэффициентами нелинейности деформаций. Свойства грунтов можно измерить с помощью энергетических методов, предложенных еще профессором С.П. Тимошенко [3]. К ним относится «прозвучивание» грунта и здания в целом энергией микросейсмов. Микросейсмывозникают под воздействием гравитационных сил космоса и существуют всегда и везде. В условиях мегаполиса к ним добавляются техногенные источники излучения в диапазоне до 250 Гц и более. При прохождении микросейсмыв с больших глубин таких крупных неоднородностей, как морена и верхняя часть разреза до фундамента, происходит их нелинейное дифракционное искажение, которое обогащается увеличением числа гармоник в спектре сигналов, их интерференцией и появлением параметрических нелинейных резонансных частот в спектре (суммарных, разностных и субгармоник). Физически они обусловлены резонансными свойствами слоев, их плотностью, минеральным составом скелета, водонасыщенностью, наличием пузырьков газа и воздуха, гранулометрическим составом. Так, например, по данным известных сейсмологов проф. Е.А. Вознесенского и д.ф.-м.н. О.В. Павленко, для слабосвязных грунтов характерна резко выраженная избирательная чувствительность к динамическим нагрузкам естественного и техногенного происхождения определенных частот от 1 до 45 Гц [4], [5]. Эти частоты различны для грунтов разной дисперсности. Так, максимумы доминантных частот супесей и пылеватых песков смещаются по мере снижения дисперсности в более низкочастотную область – с 27...35 до 10...12 Гц. Выделяются 2-3 пика, разделенные минимумом. Соотношения максимумов и минимумов чередуются с геометрической прогрессией. Это поведение интерпретируется как проявление супергармонического резонанса в связанной нелинейной колебательной системе частиц грунта разной дисперсности, или, другими словами, это интерференционные минимумы и максимумы, обусловленные фокусировкой лучей и их изменением по пространству и во времени. Спектр суперрезонансных частот (внутренних собственных частот слоев и прослоек) лежит в области от 90...100 до 175...180 Гц и повышается с увеличением их дисперсности. Таким образом, весь спектр отклика грунта на динамическое воздействие микросейсмыв естественного и техногенного происхождения можно зарегистрировать высокочувствитель-

ной аппаратурой как в подвале здания, так и на этажах. При этом чувствительность нелинейных свойств параметрических резонансов, излучаемых слоями осадконакопления грунта, во много раз больше, чем самих динамических модулей, и сильно нелинейно зависит от амплитуды динамического воздействия при прохождении микросейсмыв в фундаменте и в надземной части здания [6]-[8].

Особо информативными при вибромониторинге являются обнаружение и применение параметрических резонансов, имеющих свои признаки и особенности [2]. К ним относятся:

- 1) параметрический резонанс в среде, который наступает при выполнении определенных условий, а именно соотношений частоты вибрации шпунта (забивки свай) и собственной частоты слоев грунта, и зависит от их толщины, неравномерности и вязкости;
- 2) параметрический резонанс, который, в отличие от обычного, представляет собой пороговый эффект, так как при наличии трения и вязкости возможен лишь при достаточной амплитуде изменения параметра, т. е. при достаточной глубине модуляции, превосходящей критическое значение;
- 3) амплитуда колебаний слоев грунта, которая растет во времени экспоненциально, если глубина модуляции превосходит пороговое значение;
- 4) возбуждаются наиболее интенсивные колебания, если частота модуляции вдвое больше частоты основного тона;
- 5) эффективный рост амплитуд колебаний слоев также возможен, когда два цикла модуляции происходят на протяжении трех, пяти или другого числа четных или нечетных периодов собственных колебаний;
- 6) одновременно с появлением комбинационных частот в огибающей сигналов возникает явление самодетектирования и модуляции. Это объясняется тем, что при возрастании порогового давления воды вместо ламинарного течения возникает режим турбулентности, вихреобразования и явления кавитации. Известно, что в этом случае возникает модуляция (амплитудно-частотная), характеризующая также слои грунта на их собственных частотах. При достижении критического порогового давления 100% возникает хаотизация дискретных составляющих, что соответствует процес-

су разрушения структуры грунта. Этот признак может служить началом разрушения грунта.

Для измерений нелинейных динамических параметров грунтов и в целом сооружений «соколеблющаяся масса грунта – здание» был разработан многоканальный программно-аппаратный измерительный комплекс «Геореконструкция – ГлобалТест». Многоканальный программно-аппаратный комплекс адаптирован к условиям заселенных домов при их обследовании и мониторинге при производстве геотехнических работ вблизи.

В состав программно-аппаратного комплекса входит не менее двух высокочувствительных автономных регистраторов ударных и вибрационных воздействий АДМВ-06 (сейсморегистраторов), обеспечивающих измерение ускорения микросейсмиков при ударных и вибрационных процессах одновременно по трем осям и записи результатов измерений с привязкой к реальному масштабу времени [9].

Конструктивно АДМВ-06 представляет собой герметичный прямоугольный корпус из алюминиевого сплава, внутри которого размещены пьезоэлектрический вибропреобразователь и электронный блок. На торцевых поверхностях закреплены соединитель USB, кнопка включения питания, индикаторы питания (зеленый) и разрядки батареи (красный).

Принцип действия АДМВ-06 основан на преобразовании сигнала, поступающего от встроенного трехкомпонентного вибропреобразователя при ударных и вибрационных воздействиях в низкоимпедансный сигнал напряжения, дальней-

шей его оцифровке при помощи 24-разрядного АЦП и записи в память регистратора. АДМВ-06 имеет встроенные фильтры Баттерворта ФНЧ и ФВЧ, обеспечивающие затухание не менее 120 и 40 дБ/декаду соответственно.

Объем внутренней памяти в 1024 Мбайт обеспечивает продолжительность записи до 246065 с и сохранение до 123032917 измеренных значений по каждой оси.

Питание АДМВ-06 осуществляется от встроенного аккумулятора «Li-ion» (5400 мА·ч) напряжением 7,2 В или аналогичного аккумулятора. Время непрерывной работы АДМВ-06 – не менее 14 дней.

Внешний вид, расположение органов контроля и подключения АДМВ-06 представлены на *рис. 1*.

АДМВ-06 зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений, разрешенных для применения на территории РФ, под № 63758-16.

Пакет программ матобеспечения программно-аппаратного комплекса включает в себя реализацию набора дипольных параметрических антенн, расположенных попарно с трехкомпонентными чувствительными элементами по всему периметру несущих стен здания (на чердаке либо в самых слабых местах жесткости – на подоконниках последних этажей, а также в подвалах).

В результате регистрации и получения спектров Фурье-образов, а также спектров когерентности можно представить информацию:

- о параметрах акустической жесткости среды грунта (при расстановке сейсморегистраторов, например в подвале здания или на фундаменте);



Рис. 1. Расположение органов управления и подключения

- о параметрах здания;
- о параметрах всего сооружения в целом «грунт основания – здание».

При этом:

- амплитуда резонансов спектра несет информацию о структурных неоднородностях среды и дефектах конструкции;
- фаза содержит информацию о термодинамических параметрах среды;
- коэффициенты поглощения и рассеяния неоднородностей среды – о ее термодинамических параметрах, связанных с диссипацией сейсмоакустической энергии;
- соотношение амплитуд компонент сигнала несет информацию о поляризации и трансформации упругих волн, т. е. об упругой анизотропии среды или о неравномерных осадках фундамента и изменении прочности на срез;
- глубина минимума интерференционной структуры спектра (либо взаимного спектра Фурье, либо спектра когерентности) несет информацию о рассеянной компоненте многократно отраженных от слоев грунта сигналов. А эта компонента связана с изменением акустической жесткости (разуплотнением), уменьшением плотности и скорости волн, что характерно для увеличения числа циклов воздействия во времени.

Программное обеспечение построено на основе вычисления функции когерентности, взаимных спектров Фурье, вейвлет-анализа огибающей по Гильберту, кепстра и других видов обработки реализующей интерферометрию среды грунта и сооружения. Все перечисленные параметры, по аналогии с геологическими характеристиками, несут информацию об изменении коэффициента внутреннего трения и коэффициента сцепления.

## Экспериментальные исследования

В качестве примера использования признаков при оценке несущей способности здания и мониторинга можно привести следующее. В Санкт-Петербурге было обследовано здание на Свердловской набережной, д. 3, традиционными методами по ТСН 50-302-2004, с использованием геодезии и др. Здание находится в 50 м от набережной р. Невы. Геологический разрез и оценка динамической устойчивости показали, что грунты соответствуют слабосвязанным водонасыщенным пылеватым пескам с остатками торфа и растительности. Этот класс грунтов соответствует аномально низкой динамической устойчивости. В этом классе даже при незначительной интенсивности динамического воздействия наблюдаются резкая потеря прочности, быстрое разжижение водонасыщенных слабых грунтов. Это связано с особенностью их структуры: кулоновское трение меньше, чем в песке, а коагуляционная сетка слабая и прерывистая. Относительно низкая проницаемость затрудняет диссипацию порового давления и облегчает разжижение. С повышением количества мелких частиц при их содержании более 5% их способность к разжижению резко увеличивается. В результате обследования здание было признано категории «ограниченно работоспособное с обязательным мониторингом». В заключение была высказана причина повреждения здания, связанная с плохими качеством изысканий и производством работ при строительстве. Дальнейшая эксплуатация при строительстве набережной (вибропогружение шпунта) и длительное воздействие транспорта привели к развитию дефектов в здании.

Одновременно здание было обследовано с помощью инструментального метода оценки по дина-

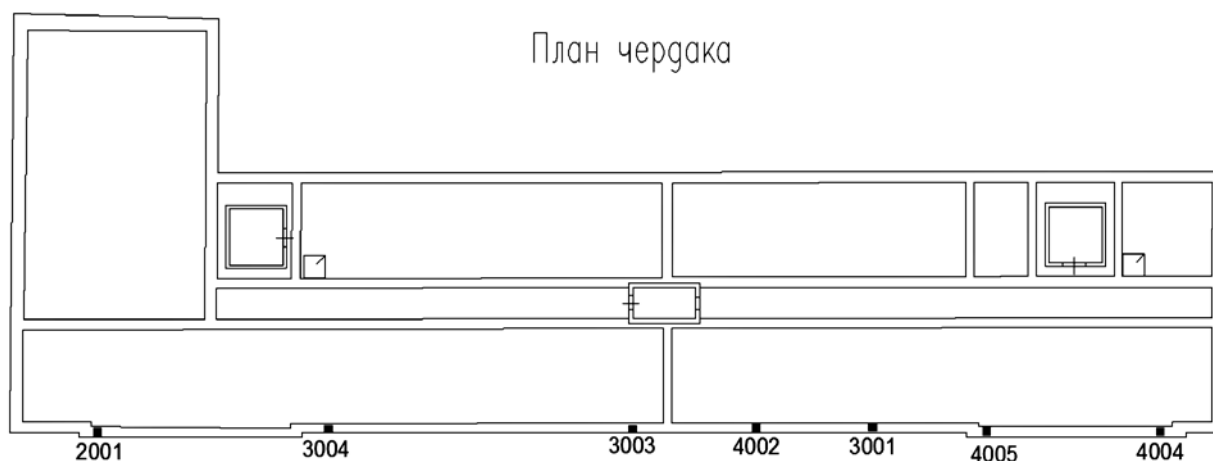


Рис. 2. Сейсморегистраторы 20-часовой схемы расстановки

мическим параметрам согласно ГОСТ 31837-2011. Схема измерений представлена на *рис. 2*.

На *рис. 3* представлена томография пространственной жесткости несущих стен здания. Основная частота колебаний здания составляет 2...2,5 Гц.

В соответствии с *табл. 1*, здание было отнесено к категории «ограниченно работоспособное с обязательным мониторингом», что совпадает с категорией, полученной традиционными методами с применением геодезических данных, которые проводились только в дворовой части здания, так как фасад был облицован керамический плиткой.

После обследования здания начался очередной ремонт набережной с вибропогружением шпунта.

По просьбе владельцев здания в целях оценки степени разрушения грунта был произведен мониторинг здания в течение всего процесса работ (24 ч). Интегральная оценка по ТСН 50-3002-2004 для этих условий показала, что нормы по ускорению уровня вибраций не превышены ( $0,15 \text{ м/с}^2$ ). В то же время были измерены во времени нелинейные признаки разрушения грунта основания.

### Результаты экспериментальных исследований при мониторинге во время вибропогружения шпунта

Выборочные значения, полученные в процессе вибропогружения шпунта на Свердловской набережной, представлены на *рис. 4-9\**.

Таблица 1

**Зависимость категории технического состояния здания от пространственной жесткости кирпичных стен по ядрам, характеризующаяся коэффициентом когерентности (степени трещиноватости зон)**

Условное обозначение	Значение коэффициента когерентности на частоте основного тона (Y компонента), $\gamma$	Категория технического состояния здания
Красный цвет	0,1...0,2	Аварийное
Оранжевый цвет	0,2...0,3	Предаварийное
Желтый цвет	0,3...0,6	Ограниченно работоспособное с обязательным мониторингом
Светло-зеленый цвет	0,6...0,8	Ограниченно работоспособное без мониторинга
Зеленый цвет	0,8...0,95	Здание без трещин и неравномерных осадок. Нормативное

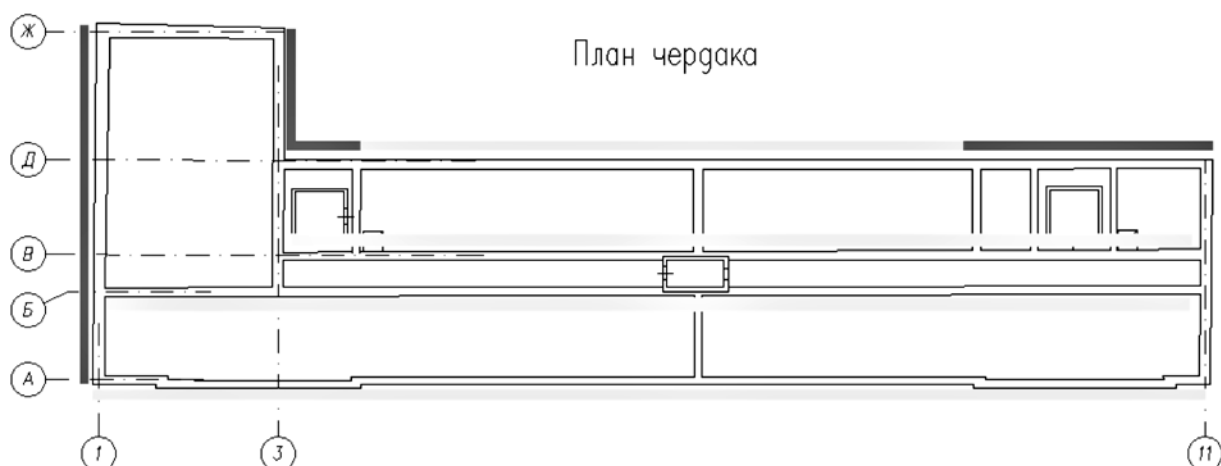


Рис. 3. Томография пространственной жесткости несущих стен здания (светло-серые утолщенные линии соответствуют желтому цвету, описанному в *табл. 1*; темные утолщенные линии – соответствуют светло-зеленому цвету, описанному в *табл. 1*)

\* См. цветные полосы № 2 и 3 обложки нашего журнала.

Признаки соответствуют разным схемам измерения, а именно для пар АДМВ-06, реализующих дипольные мультипликативные антенны, установленных на чердаке по периметру несущих стен или одновременно в подвале и на чердаке здания для признаков, реализующих динамическую функцию когерентности (спектр когерентности), а также для одиночных сейсморегистраторов в подвале.

Ввиду сложности процесса изменения во времени нелинейных характеристик грунта, для повышения надежности распознавания начала разжижения грунта основания здания использовались альтернативные группы признаков:

- 1) по несущей частоте сигналов, полученных при вибропогружении шпунта и огибающей по Гильберту;
- 2) по параметрическим резонансам вибропогружателя, его гармоник и комбинационных суммарных и разностных частот.

При этом были использованы разные параметры Фурье-образов по усреднению, разрешающей способности и виду отображения информации (динамический во времени, на плоскости, 3D-«водопад» и др.).

На рис. 10-12\* представлены характеристики изменения спектра Фурье-сигнала во времени при

вибропогружении шпунтов в течение 3,5 ч для частот до 240 Гц (для одиночного сейсморегистратора в подвале, ось Y): рис. 10 – на плоскости (амплитуда отмечена цветом, уровень дан в децибелах); рис. 11 – в координатах 3D-«водопад»; рис. 12 – в координатах 3D-«водопад», для наглядности развернутый на 90°.

Из рис. 10-12 видно, что:

- а) в спектре присутствуют 6 гармоник основной частоты вибропогружателя от 37,5 до 224 Гц;
- б) присутствуют суммарные и разностные комбинационные параметрические резонансы (ниже и выше по частоте);
- в) в моменты времени 1 ч и 2,7 ч наблюдается резкое снижение всех частот одновременно;
- г) индекс частотной модуляции всех гармоник увеличивается во времени от 15...20 % до критических значений более 90 % (по уровню 0,7) и захватывает область частот основного тона колебаний сооружения «грунт основания – фундамент – надземная часть». Указанные факторы свидетельствуют о существенном снижении сейсмоакустической жесткости сооружения и появлении зоны неустойчивости структуры грунта. По этим же исходным данным были построены зависимости амплитуд гармоник относительно первой гармоники во

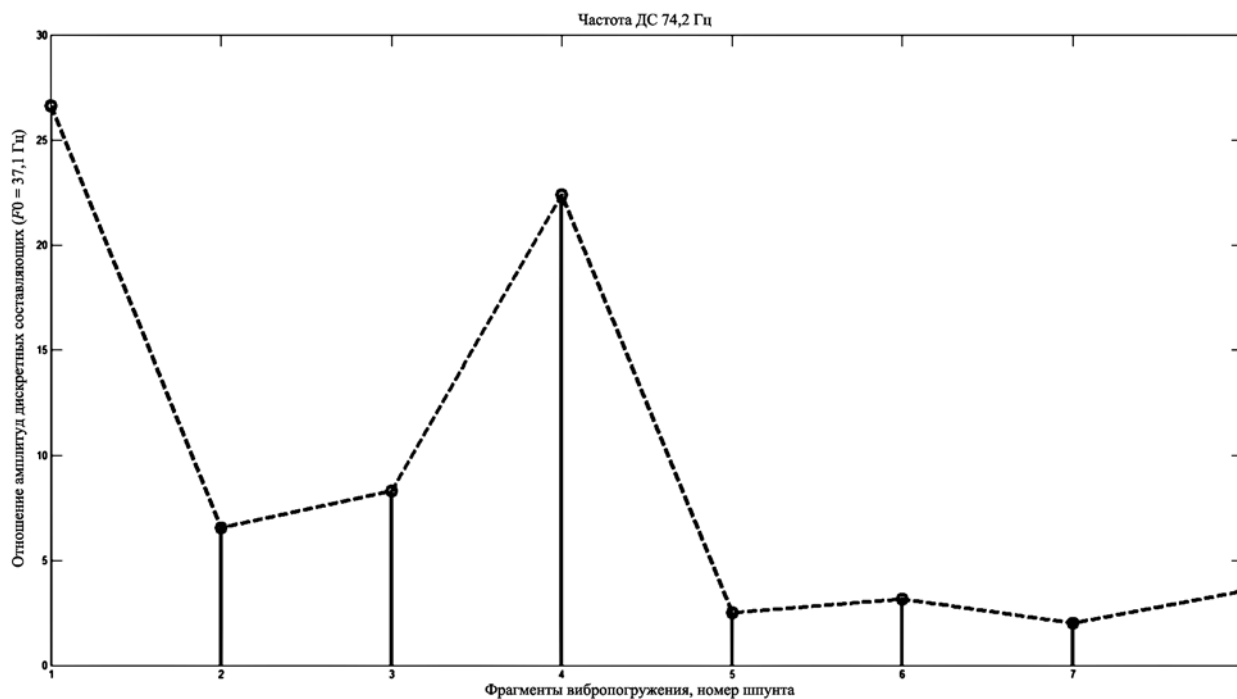


Рис. 13а. Зависимости амплитуд гармоник относительно первой гармоники частотой 74,2 Гц во времени

\* См. цветную полосу № 3 обложки нашего журнала.



времени. Они представлены на *рис. 13*: а) для частоты 74,2 Гц; б) для частоты 183,5 Гц; в) для частоты 220 Гц.

По оси ординат отложены отношения амплитуд гармоник (относительно первой) во времени, по оси абсцисс – этапы вибропогружения. Из них видно увеличение степени нелинейности процесса до 4-й серии циклов, а далее – от 4-й серии цик-

лов до 8-й серии – резкий экспоненциальный спад амплитуд высших гармоник в 10...15 раз. Согласно работам [4], [7], это соответствует перераспределению энергии гармоник за счет аномального затухания суммарных комбинационных частот параметрических резонансов, соответствующих слоям грунта, и также является признаком начала разжижения грунта.

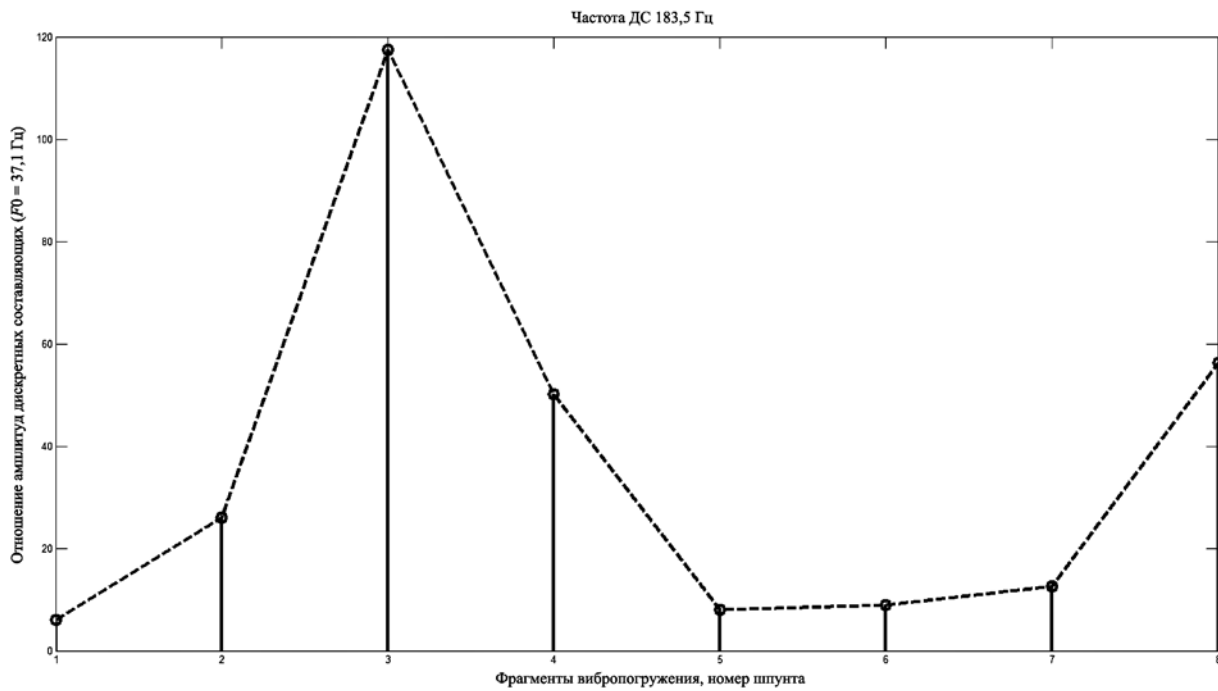


Рис. 13б. Зависимости амплитуд гармоник относительно первой гармоники частотой 183,5 Гц во времени

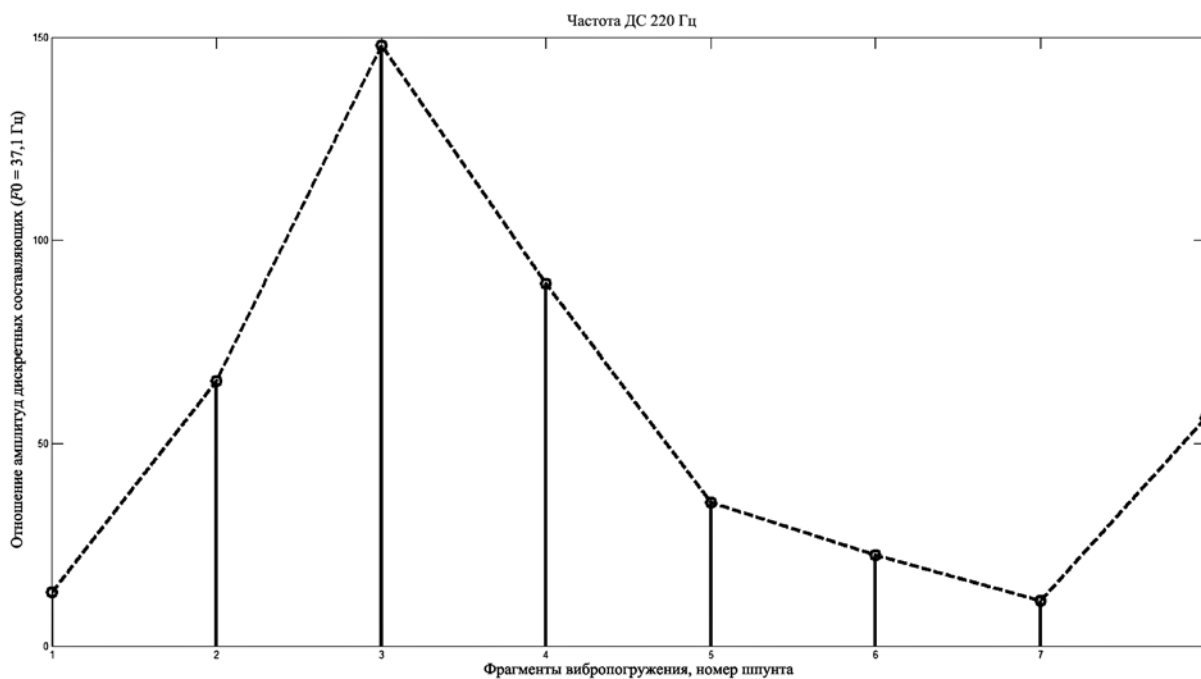


Рис. 13в. Зависимости амплитуд гармоник относительно первой гармоники частотой 220 Гц во времени

На *рис. 14\** в тех же условиях измерения представлен динамический спектр в огибающей сигналов вибропогружения в координатах частота – амплитуда – время. Как видно из *рисунка*, значения дискретных составляющих модуляции затухают во времени после 4-й серии циклов воздействия (граница обозначена штриховой линией белого цвета). Эти дискретности в спектре огибающей, по-видимому, связаны с нелинейным характером порового давления воды, ее турбулентностью, кавитационными явлениями и модуляцией. При достижении порогового уровня происходит хаотизация дискрет, их сильное затухание. Этот факт также свидетельствует в начале разжижения грунта.

На *рис. 4-9* представлены динамические спектры когерентности сигналов при вибропогружении шпунта в течение 21 ч и в течение 3,5 ч вибропогружения. При этом сигналы регистрировались дипольными антеннами как по горизонтальным, так и по вертикальным диафрагмам жесткости здания (подвал – чердак).

Нелинейные компоненты разностных комбинационных частот параметрических резонансов вибропогружателя шпунта при совпадении с основным тоном позволяют судить о начале неустойчивого динамического равновесия слоев грунта (соколеблющейся сжимаемой массы основания), что аналогично уменьшению угла внутреннего трения и коэффициента сцепления (или крепления фундамента).

На указанных *рис. 4-9* показано совпадение субгармоник (т. е. резонансных комбинационных частот параметрических резонансов основной частоты вибропогружателя шпунта) с частотами первых гармоник основной частоты колебаний здания, равных 2,5...5 Гц. Значения этой спектральной компоненты функции когерентности, равной 0,9 (красный цвет) на этой субгармонике и соответствующей частоте 37,5 Гц (первая гармоника вибропогружателя – тоже красный цвет), свидетельствуют, что они принадлежат одному источнику. Этот временной участок отображен в виде лупы. Данное явление характерно для всех пар антенн по вертикальным и горизонтальным диафрагмам жесткости. Как известно, наличие параметрических резонансов может «раскачать» структуру грунта, нарушить связи в соколеблю-

щейся массе грунта основания сооружения, т. е. его можно считать признаком начала разжижения грунта и появления динамической неустойчивости сооружения.

Анализ количественных характеристик указанных признаков показывает следующее. В течение процесса вибропогружения шпунта после 1,5 ч воздействия количества циклов возникают условия превышения пороговых значений, в которых нелинейные значения резко возрастают и становятся опасными с точки зрения потери динамической устойчивости.

Эти критерии-признаки начала искажения жесткости конструкции сооружения (снижения акустической жесткости грунта – разупрочнение, разжижение) в процессе вибропогружения следующие:

- 1) совпадение во времени циклических вибровоздействий параметрических резонансов вибропогружателя с частотой основного тона здания;
- 2) то же для спектра когерентности по всем компонентам;
- 3) увеличение индекса частотной модуляции гармоник вибропогружателя до 80...90 %;
- 4) отношение амплитуд первой и последней гармоник равно 10...15, т. е. присутствует экспоненциальное затухание;
- 5) затухание амплитуд в огибающей в 10 раз.

Обнаружение указанных признаков позволяет судить о снижении геологических характеристик, а именно угла внутреннего трения и коэффициента сцепления.

## Выводы

1. С помощью программно-аппаратного комплекса «Георекострукция – ГлобалТест» экспериментально исследованы нелинейные характеристики грунта основания зданий при «просвечивании» сооружений энергией микросейсмов и техногенными источниками.

2. Эти характеристики позволяют на основе вычисления функции когерентности и спектров Фурье различных модификаций и отображений инструментально определить несущую способность зданий и в процессе мониторинга определить степень снижения пространственной жесткости здания и разрушения грунта основания (снижения его акустической жесткости).

\* См. цветную полосу № 3 обложки нашего журнала.

3. Отмечено, что в условиях палеодолин, приразломных зон (условиях тектоники), где имеются слабосвязанные, водонасыщенные с остатками торфа и растительности пески с наличием пылеватых частиц, грунты аномально динамически неустойчивы к техногенным динамическим нагрузкам.

4. Разработаны методики обследования и мониторинга зданий при применении программно-аппаратного комплекса.

5. На основе этих исследований выданы рекомендации по корректировке ТСН-50-302-2004 в Санкт-Петербурге в части обследования и мониторинга зданий.

*Список литературы:*

1. *Бреховских Л.М., Лысаков Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. – М.: Наука, 2007. 369 с.
2. *Клей К.С., Медвин Г.* Акустическая океанография. – М.: Мир, 1980. 582 с.
3. *Тимошенко С.П.* Колебания в инженерном деле. – М.: Машиностроение, 1985. 475 с.
4. *Павленко О.В.* Сейсмические волны в грунтовых слоях. – М.: Научный мир, 2009. 260 с.
5. *Вознесенский Е.А.* Динамическая неустойчивость грунтов. – М.: Ленанд, 2014. 264 с.
6. *Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях. – СПб.: Группы компаний, 2006. 384 с.
7. *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. 20-24.
8. *Шашкин А.Г.* Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. – М.: Академическая наука. Геомаркетинг, 2014. 352 с.
9. *Киртичев А.А.* Автономные регистраторы виброударных воздействий для динамического геотехнического мониторинга зданий и сооружений // Точка опоры. 2016. № 7 (213). С. 22.

*Сергей Анатольевич Татаркин,*  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
г. геофизик,

*Максим Андреевич Шашкин,*  
инженер,

*ООО «ПИ Геореконструкция»,*  
*Сергей Игоревич Низовцев,*  
магистрант,

*ИТМО,*

*инженер,*

*ООО «ПИ Геореконструкция»,*  
г. С.-Петербург,

*Александр Александрович Киртичев,*  
канд. техн. наук, директор,

*ООО «ГлобалТест»,*

г. Саров,

*Петр Николаевич Шкатов,*

д-р техн. наук, профессор,

*Московский технологический университет,*

г. Москва,

*e-mail: petr\_shkatov@mail.ru*

**ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ,  
РУКОВОДИТЕЛЕЙ СЛУЖБ ИНФОРМАЦИИ И БИБЛИОТЕК!**

**ПРЕДЛАГАЕМ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ  
«ПРИБОРЫ»  
НА 2017 ГОД.**

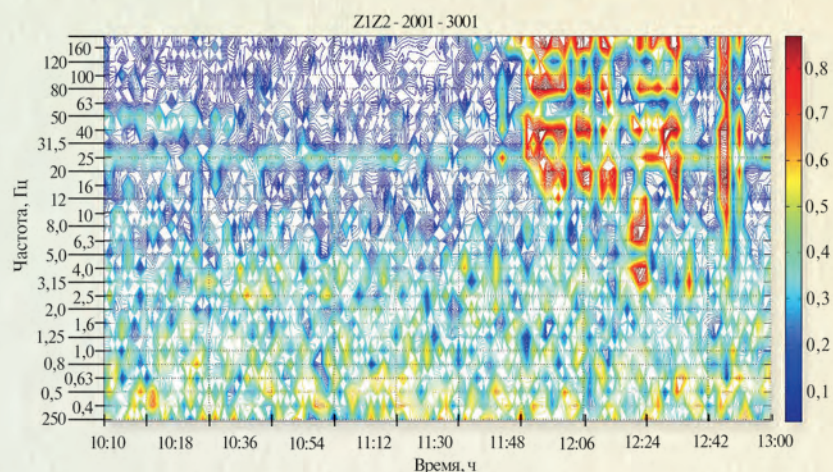
**Индекс журнала  
в каталоге Агентства «Роспечать» – 79727.**

**Вы можете оформить льготную подписку через редакцию.**

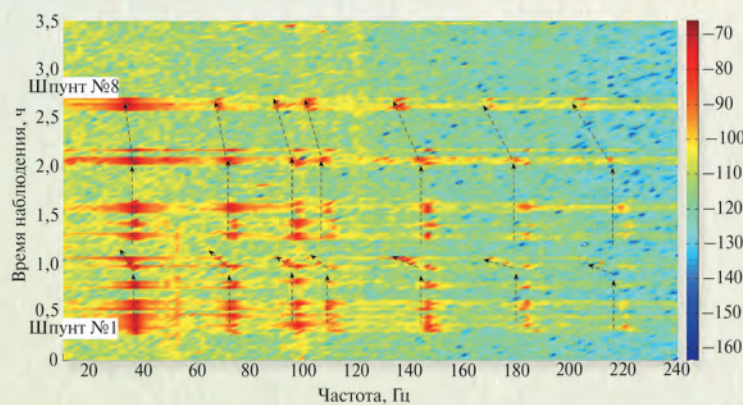
**Наши тел.: (495) 695-10-70, 695-10-71.**

**Стоимость комплекта (12 номеров) – 12000 руб.**

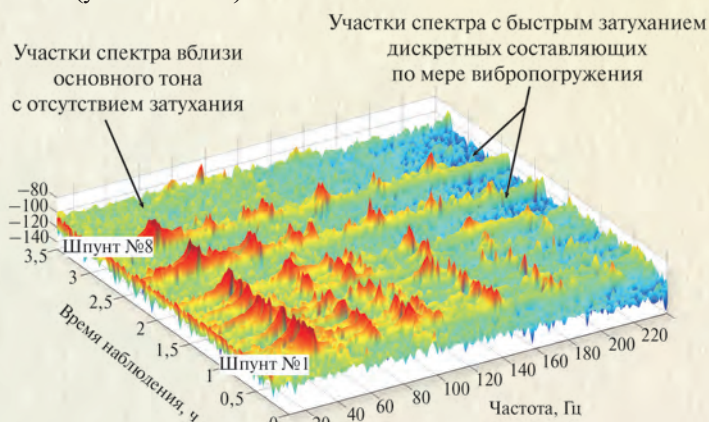
Иллюстрации к статье  
**С.А. Татаркина, М.А. Шашкина, С.И. Низовцева, А.А. Курничева, П.Н. Шкатова**  
**«ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МИКРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ, МОНИТОРИНГА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ В ОСОБЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ»**



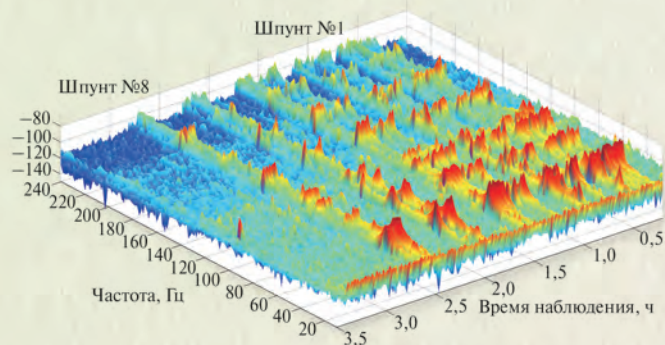
**Рис. 9. Спектр когерентности: Z-компонента; сейсморегистраторы 2001 – 3001 (увеличенный)**



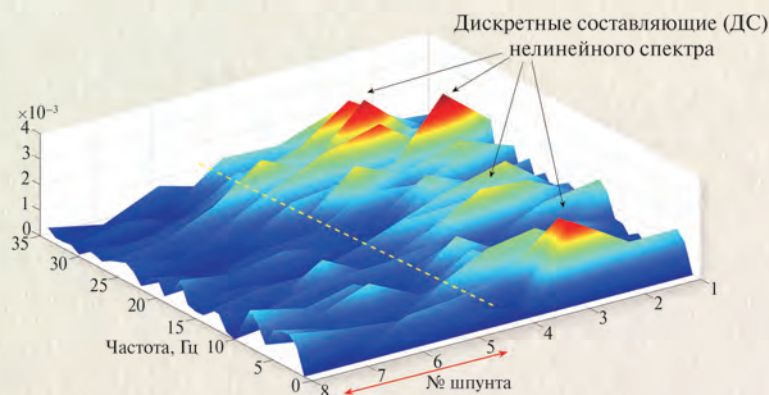
**Рис. 10. Динамический спектр вибропогружения на плоскости**



**Рис. 11. 3D-динамический спектр вибропогружения**



**Рис. 12. 3D-динамический спектр вибропогружения, развернутый на 90°**



**Рис. 14. Динамический спектр в огибающей сигналов вибропогружателя**