

## **ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ БУГРИНСКОГО МОСТА МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ СТОЯЧИХ ВОЛН ИЗ МИКРОСЕЙСМ**

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

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель каф. геофизики; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла маркса 20, доцент каф. геофизики

### ***Антон Александрович Гриценко***

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, каф. геофизики e-mail: a.gritsenko3@g.nsu.ru

### ***Елизавета Эдуардовна Косякина***

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса 20, студент Физико-технического факультета, кафедры геофизических систем, e-mail: lilavati21@mail.ru

В статье показано применение технологии инженерно-сейсмологического обследования конструктивного состояния инженерных сооружений с целью обнаружения в них аномальных зон на примере обследования Бугринского моста г. Новосибирска.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость мостов, стоячие волны, неразрушающий контроль (NDT)

## **STABILITY DIAGNOSTICS OF THE BUGRINSKY BRIDGE BY THE METHOD OF STANDING WAVES DETERMINATION FROM MICROSEISM**

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

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Researcher, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Senior Lecturer of the geophysical department; Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue Novosibirsk 630073, Russia, Associate professor of the geophysical department

### ***Anton A. Gritsenko***

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, MD Student. e-mail: a.gritsenko3@g.nsu.ru

### ***Elizaveta E. Kosyakina***

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Avenue 20, Student of the Faculty of Physics and Technology, Department of Geophysical Systems, e-mail: lilavati21@mail.ru

The article shows the use of a low-cost technology of engineering and seismological examination of the structural state of engineering structures in order to detect anomalous zones in them by the example of the survey of the Bugrinsky bridge in Novosibirsk.

**Keywords:** seismic resistance of bridges, standing waves, nondestructive testing (NDT)

Огромное количество важных инженерных сооружений за долгий период эксплуатации, рано или поздно будут скрывать в себе опасные дефекты. В свою очередь, большинство мостов было спроектировано и построено 30 лет назад. Тогда, используемая при проектировании сооружения, плотность транспортного потока была значительно ниже современной, что неизбежно ведет к повышенной скорости износа конструкций мостов. В свою очередь поддержание исправного технического состояния мостов важно, как для нормального функционирования транспортной сети государства, так и для безопасности людей, использующих транспортную инфраструктуру.

Так, следует проводить периодический осмотр состояния конструкции мостов на предмет выявления дефектов, однако важным ограничением, помимо требований к высокой точности метода диагностики, является то, что работы по обследованию сооружения необходимо проводить непосредственно во время эксплуатации объекта.

На сегодняшний день для оценки и мониторинга состояния мостов используются различные методы, позволяющие проводить периодическое их обследование. Однако большинство из используемых методов являются дорогостоящими, предусматривают стационарное размещение аппаратуры на мосте или имеют ряд технических ограничений, связанных с воздействием внешней среды, таким как постоянная вибрация от транспорта, изменение освещения, температуры и прочих факторов. Так, одними из новейших методов, применяемых для мониторинга состояния мостов являются оптические методы, основанные на системах распознавания образов для расчета смещений и деформаций конструкции [1,2,3], различного масштаба радиолокационные методы (георадарная и интерферометрическая радарная съемка) [4,5], методы, основанные на регистрации смещений и деформаций конструкции [6,7].

В настоящей работе предлагается использование пассивного сейсмического метода, разработанного коллективом авторов ИНГГ СО РАН, позволяющего выделять стоячие волны из шумового поля и решать различные инженерные задачи [8,9,10,11].

Разработанная методика выделения стоячих волн из микросейсм состоит в следующем:

1. Регистрация когерентных паразитных шумов, для последующего учета при обработке полученных данных.
2. Регистрация шумовых записей на исследуемом объекте для выделения в них стоячих волн с использованием двух датчиков – статично зафиксированного в одной точке и перемещаемого.

3. Нормировка уровня шумов перемещаемого датчика на уровень опорного для каждого измерения.

4. Разбиение шумовых записей на блоки по 8192 отчета.

5. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путем их суммирования.

6. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади или профиле.

Важно отметить, что отсутствие источника, возбуждающего колебания в исследуемой среде и использование метода накопления в дальнейшей обработке накладывает ограничения на использование регистрирующей аппаратуры. Так, важно чтобы используемая аппаратура отличалась отсутствием собственных шумов, которые будут накапливаться в процессе регистрации, что напрямую повлияет на качество данных. Подбор такой аппаратуры следует проводить экспериментально с помощью измерения собственных шумов регистратора [12]. Так для проведения эксперимента на Бугринском мосте был выбран комплекс из цифрового регистратора Texan (RefTek-125A) и геофонов GS-20DX (рис. 1).



Рис. 1 Вертикальные и горизонтальные геофоны GS-20DX и одноканальные автономные цифровых регистраторов Texan (RefTek-125A)

В результате накопления большого количества амплитудных спектров, построенных для шумовых записей, получается выделить регулярные пики, являющиеся когерентными при суммировании, соответствующие стоячим волнам. Для стоячих волн сжатия-расширения в геометрически ограниченных телах характерна связь между собственными частотами и расстоянием от местоположения регистратора до границы тела, от которой происходит отражение волны и описываемая следующим соотношением:

$$f_n = \frac{nV}{2l},$$

где  $n$  – номер моды стоячей волны,  $V$  – скорость распространения упругих волн,  $l$  – расстояние между от регистратора до отражающей границы.

Непосредственно во время исследования объекта регистрация шумовых данных происходит с помощью использования пары датчиков, один из которых располагается статично на объекте, далее будем называть его опорным, а второй перемещается, покрывая всю исследуемую площадь. Опорный датчик применяется нормировки уровня шумовой записи переносного датчика, убирая различия в шумовых трассах, вызванные уровнем внешних шумов. Вместо этого можно использовать единовременную регистрацией данных с использованием большого количества регистраторов, однако такой подход в ряде случаев может оказаться более затратным и трудоемким, нежели использование всего двух сейсмоприемников.

Так с использованием этой технологии были выделены изгибные моды колебаний Бугринского моста и построено их амплитудно-частотное распределение (рис. 2).

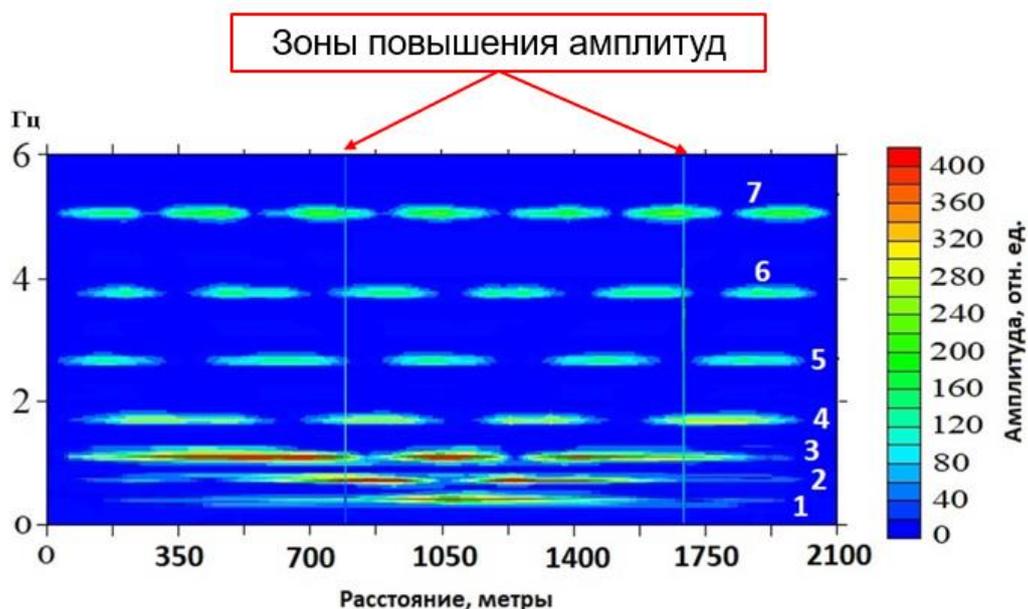


Рис. 2 Распределение амплитудных спектров шумовых записей вдоль Бугринского моста (по ширине), цифрами обозначены номера мод изгибных колебаний

На рисунке отчетливо выделяются две области повышенных амплитуд колебаний, наблюдаемые на всех частотах. При сравнении с результатами компьютерного моделирования (рис. 3), установлено, что данные зоны повышения амплитуд являются аномальными и, вероятно, связаны с наличием дефектов в конструкции.

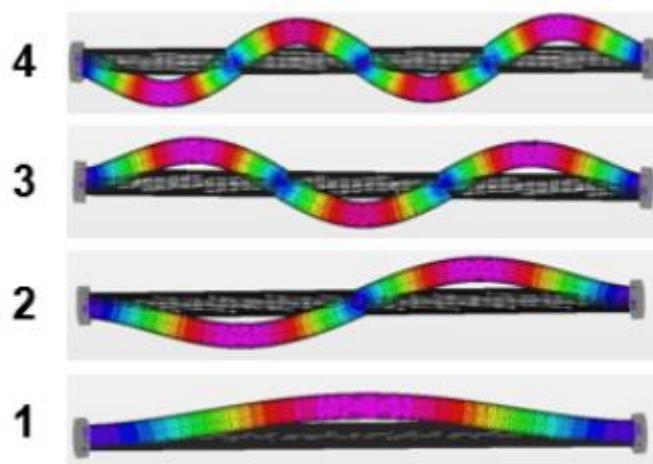


Рис.3 Изгибные моды собственных колебаний Бугринского моста, полученные в результате компьютерного моделирования

Немаловажным является тот факт, что пространственное местоположение левой зоны повышенных амплитуд (рис.2), соответствует зоне падения детали моста на автомобиль в 2017 г (рис.4), что также позволяет верифицировать возможность применения используемой методики выделения стоячих волн из сейсмоакустических шумов к обследованию мостов.



Рис. 4. Место отлома и упавшая деталь конструкции моста (2017 г)

*Работа выполнена в рамках гранта, по итогам конкурса мэрии города Новосибирска на предоставление грантов в форме субсидий в сфере научной и инновационной деятельности*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ngeljaratan L., Moustafa M.A. Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation // Engineering Structures. – 2020. – Vol. 213. – ISSN 0141-0296.

2. Wang Y., Tumbeva M.D., Thrall A.P., Zoli T.P. Pressure-activated adhesive tape pattern for monitoring the structural condition of steel bridges via digital image correlation // *Struct Control Health Monit.* – 2019. – Vol. 26 – Is. 8. – e2382.
3. Xiao P., Wu Z.Y., Christenson R, Lobo-Aguilar S. Development of video analytics with template matching methods for using camera as sensor and application to highway bridge structural health monitoring // *Civil Struct Health Monit.* – 2020. – 10. – P.405–424.
4. Alani A.M., Tosti F., Ciampoli L.B., Gagliardi V., Benedetto A. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies // *NDT & E International.* – 2020. – Vol. 115. – ISSN 0963-8695.
5. Selvakumaran S., Rossi C., Marinoni A., Webb G., Bennetts J., Barton E., Plank S., Middleton C. Combined InSAR and Terrestrial Structural Monitoring of Bridges // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2020. – Vol. 58. – Is. 10. – P. 7141-7153.
6. Kaloop M. R., Hwang W.S., Elbeltagi E., Beshr A., Hu J.W. Evaluation of Dorim-Goh bridge using ambient trucks through short-period structural health monitoring system. // *Structural Engineering and Mechanics.* – 2019. – 69(3). – P.347–359.
7. Kaloop M.R., Kim K.H., Elbeltagi E., Jin X., Hu J.W. Service-Life Evaluation of Existing Bridges Subjected to Static and Moving Trucks Using Structural Health Monitoring System: Case Study. // *KSCE Civ Eng.* – 2020. – 24. – P.1593–1606.
8. 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.
9. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment. // *Geophys Prospect.* – 2018. – 66:342-53.
10. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomayezwec L. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 125.* – 2019. – 105739.
11. Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. Определение пустот под бетонными плитами крепления верховых откосов плотины Новосибирской ГЭС по акустическим шумам // *Процессы в геосредах.* – 2020. – № 4 (26). – С. 970-975.
12. Eponeshnikova L., Dergach P., Duchkov A. Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // *82nd EAGE Annual Conference and Exhibition Workshop Programme (Amsterdam, The Netherlands, December 8-11, 2020): Abstracts.* – Amsterdam, 2020. – 2020. – P. 1-5.

## REFERENCES

1. Ngeljaratan L., Moustafa M.A. Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation // *Engineering Structures.* – 2020. – Vol. 213. – ISSN 0141-0296.
2. Wang Y., Tumbeva M.D., Thrall A.P., Zoli T.P. Pressure-activated adhesive tape pattern for monitoring the structural condition of steel bridges via digital image correlation // *Struct Control Health Monit.* – 2019. – Vol. 26 – Is. 8. – e2382.
3. Xiao P., Wu Z.Y., Christenson R, Lobo-Aguilar S. Development of video analytics with template matching methods for using camera as sensor and application to highway bridge structural health monitoring // *Civil Struct Health Monit.* – 2020. – 10. – P.405–424.
4. Alani A.M., Tosti F., Ciampoli L.B., Gagliardi V., Benedetto A. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies // *NDT & E International.* – 2020. – Vol. 115. – ISSN 0963-8695.
5. Selvakumaran S., Rossi C., Marinoni A., Webb G., Bennetts J., Barton E., Plank S., Middleton C. Combined InSAR and Terrestrial Structural Monitoring of Bridges // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2020. – Vol. 58. – Is. 10. – P. 7141-7153.

6. Kaloop M. R., Hwang W.S., Elbeltagi E., Beshr A., Hu J.W. Evaluation of Dorim-Goh bridge using ambient trucks through short-period structural health monitoring system. // *Structural Engineering and Mechanics*. – 2019. – 69(3). – P.347–359.
7. Kaloop M.R., Kim K.H., Elbeltagi E., Jin X., Hu J.W. Service-Life Evaluation of Existing Bridges Subjected to Static and Moving Trucks Using Structural Health Monitoring System: Case Study. // *KSCE Civ Eng*. – 2020. – 24. – P.1593–1606.
8. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomajezve L. O vlijanii sezonnyh izmenenij rezonansnyh svojstv pripoverhnostnyh gruntov na sejsmobeзопасnost' oorzhenij. // *Sejsmostojkoe stroitl'stvo. Bezopanosť soorzhenij*. – 2019. – №.3. – S. 56–64.
9. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment. // *Geophys Prospect*. – 2018. – 66:342-53.
10. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Nogomayezwec L. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 125*. – 2019. – 105739.
11. Fedin K.V., Kolesnikov Ju.I., Ngomajezve L. Opredelenie pustot pod betonnyimi plitami kreplenija verhovyh otkosov plotiny Novosibirskoj GJeS po akusticheskim shumam // *processes in geomedial*. – 2020. – № 4 (26). – S. 970-975 (In Russian).
12. Eponeshnikova L., Dergach P., Duchkov A. Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // *82nd EAGE Annual Conference and Exhibition Workshop Programme (Amsterdam, The Netherlands, December 8-11, 2020): Abstracts*. – Amsterdam, 2020. – 2020. – P. 1-5.

© К. В. Федин, А. А. Гриценко, Е. Э. Косякина, 2021