

Ю. И. Колесников^{1,2}, К. В. Федин^{1,2,3}, Д. А. Печенегов^{2,4}*

Исследование технического состояния мостов в криолитозоне пассивным сейсмическим методом стоячих волн

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

⁴ Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Приведены результаты работ, целью которых являлась оценка возможностей применения пассивного сейсмического метода стоячих волн для исследования технического состояния мостовых конструкций. Метод предполагает регистрацию микросейсмических колебаний на профиле, проходящем вдоль пролетов моста по всей его длине, разделение полученных записей на блоки, вычисление амплитудных спектров этих блоков и их накопление. Совместная визуализация накопленных спектров позволяет анализировать частоты и формы выделяемых из шумовых записей стоячих волн. Были обследованы два моста, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород в Ямало-Ненецком автономном округе. Результаты показали, что в случае отсутствия нарушений в конструкции моста и/или его основания (например, в результате оттаивания) формы собственных изгибных колебаний пролетов моста не осложнены существенными аномалиями, распределение пучностей и узлов типично для протяженного объекта. Появление осложняющих аномалий свидетельствует об изменениях в конструкции моста и/или в его основании.

Ключевые слова: диагностика мостов, пассивные сейсмические наблюдения, стоячие волны

Yu. I. Kolesnikov^{1,2}, K. V. Fedin^{1,2,3}, D. A. Pechenegov^{2,4}*

Investigating technical condition of bridges in the permafrost zone by the passive seismic method of standing waves

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴ Seismological branch FIC GS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru

Abstract. The results of the work, the purpose of which was to assess the possibilities of using the passive seismic method of standing waves for studying the technical condition of bridge structures, are presented. The method involves the recording of microseismic vibrations on a profile passing along the spans of the bridge along its entire length, the division of the received records into blocks, the calculation of the amplitude spectra of these blocks and their accumulation. Joint visualization of the accumulated spectra makes it possible to analyze the frequencies and shapes of standing waves extracted from noise records. Two bridges were examined, located in the area of permafrost in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. The results showed that in the absence of violations in the structure of the bridge and/or its base (e.g. due

to defrosting), the forms of its own flexural vibrations are not complicated by significant anomalies, the distribution of antinodes and nodes is typical for an extended object. The appearance of complicating anomalies is indicative of changes in the design of the bridge and/or its base.

Keywords: bridges diagnostics, passive seismic observations, standing waves

Введение

Мосты являются неотъемлемой частью транспортной инфраструктуры и нуждаются в регулярном мониторинге технического состояния. Скорость износа и потери устойчивости сооружений зависят от множества факторов – увеличения транспортной нагрузки относительно той, которая ожидалась при проектировании, ветрового и сейсмического режимов, непостоянства характеристик грунта в основании. Последнее особенно актуально для северных регионов России, где множество сооружений были построены на многолетнемерзлых породах (ММП). Деградация мерзлоты приводит к образованию таликов и дальнейшему проседанию грунта, а вместе с ним – свай и опор сооружений.

Разработано множество методов контроля технического состояния моста и грунтов. К самым распространенным стоит отнести методы, основанные на наблюдениях за смещениями конструктивных элементов и динамикой развития дефектов конструкций. Такие методы позволяют с использованием фотоаппаратов с высоким разрешением [1-3], инфракрасной термографии [1, 4] или лазеров [3, 5, 6] определять смещения конструкции или ее отдельных элементов и на их основе рассчитать направления и степень деформации. Методы относят к неразрушающим и часто применяют для непрерывного мониторинга состояния сооружений. Ограничения таких методов часто связаны с необходимостью стабилизировать приборы, которые могут вибрировать под влиянием сейсмических и ветровых колебаний.

Высокая точность определения смещения конструкций может быть достигнута радиолокационным методом с использованием спутников [7-8], но этот метод предполагает наличие относительно дорогого аппаратного обеспечения. Также для оценки технического состояния мостов используются методы, основанные на приложении статической и/или динамической нагрузки разной силы и скорости, симулирующие разные виды и интенсивности транспортного потока [9, 10]. Эти методы достаточно трудоемки и также предполагают наличие достаточно дорогостоящего оборудования (например, мощных вибрационных источников).

В последние годы развивается метод обследования различных гражданских и промышленных сооружений, основанный на выделении упругих стоячих волн из записей микросейсмических колебаний, зарегистрированных на поверхности или во внутренних точках данных объектов. В частности, этот метод показал хорошие результаты при обследовании протяженных объектов, например, плотин электростанций [11, 12] или трубопроводов [13]. Целью настоящего исследования являлась оценка возможностей применения пассивного сейсмического метода стоячих волн для исследования технического состояния мостовых конструкций.

Объекты и метод исследования

Исследования проводились на объектах транспортной инфраструктуры, расположенных на многолетнемерзлых грунтах, а именно, на двух железнодорожных мостах, расположенных на 31-м (рис. 1а) и 244-м (рис. 1б) километрах железной дороги «Обская – Бованенково» в Ямало-Ненецком автономном округе. Основное предназначение этой дороги – обеспечение перевозок для Бованенковского нефтегазоконденсатного и других месторождений на Ямале, для строительства и эксплуатации системы магистральных газопроводов, а также для вывоза с месторождений полуострова жидких фракций товарной продукции, в частности, газового конденсата. Интенсивная эксплуатация железной дороги, а также ее расположение в зоне распространения ММП предполагают периодическое обследование ее технического состояния, в частности, таких ее важнейших составляющих, как железнодорожные мосты. В нашем случае исследовались возможности оценки технического состояния двух железнодорожных мостов пассивным сейсмическим методом стоячих волн.

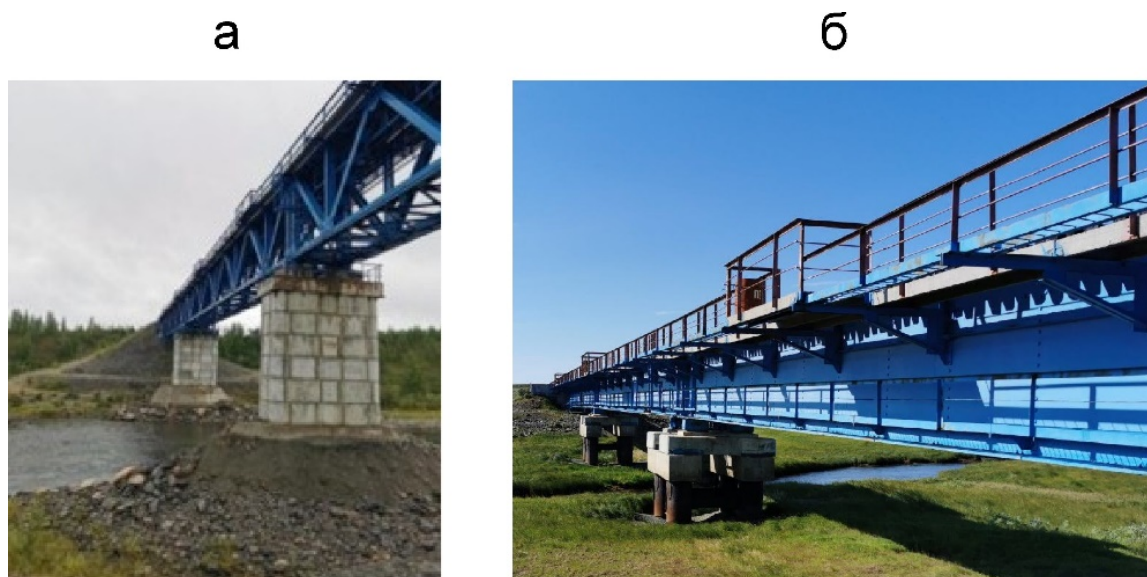


Рис. 1. Общий вид мостов на 31-м (а) и 244-м (б) километрах железной дороги «Обская –Бованенково»

Метод стоячих волн основывается на регистрации микросейсмических колебаний объекта без активного источника возбуждения волн. Полезным сигналом в методе являются собственные колебания, возникающие под воздействием микросейсм на конкретных частотах, присущих объекту. Колебания на собственных частотах имеют форму стоячих волн, по распределению амплитуд которых можно судить о целостности конструкции, ее устойчивости и пр.

Технология измерений заключалась в регистрации колебаний двумя ориентированными перпендикулярно рельсам горизонтальными геофонами GS-20DX с одноканальными автономными цифровыми регистраторами RefTek-125A (рис. 2а), установленными непосредственно на верхней поверхности мостовых проле-

тов (рис. 2б). Один геофон («опорный»), установленный в средней части моста, в процессе измерений не перемещался, второй передвигался по профилю вдоль моста с шагом 3 м. Опорный геофон применялся для нормировки уровня шумовой записи передвигного, нивелируя различия в шумовых трассах, вызванные изменениями уровня внешних шумов в процессе проведения измерений. В каждой передвижной точке производилась запись микросейсм с частотой дискретизации 1 кГц в течение 5 минут с синхронной регистрацией колебаний в опорной точке.

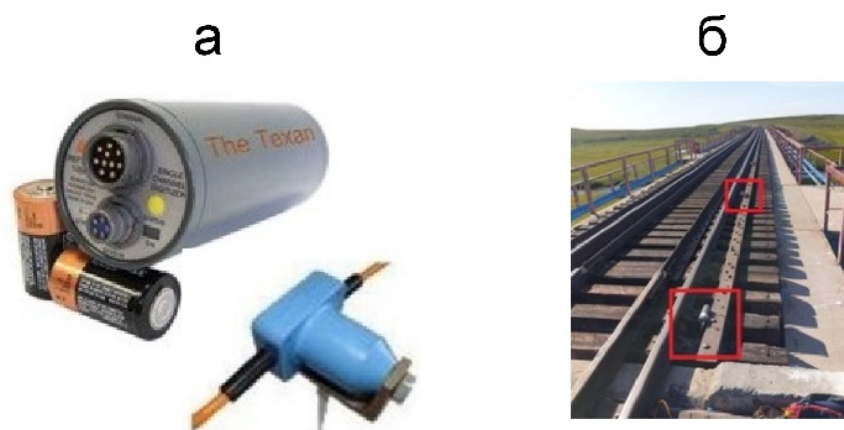


Рис. 2. Регистратор RefТек-125А и геофон GS-20DX (а); установка регистрирующей аппаратуры на поверхности моста (б), места установки отмечены красными контурами

При обработке цифровые записи для каждой точки профиля нормировались на уровень синхронной записи в опорной точке, затем они разбивались на блоки по 8192 отсчета, вычислялись амплитудные спектры этих блоков и для каждой точки проводилось накопление спектров. В результате накопления происходит выделение стоячих волн (собственных колебаний объекта) на фоне некогерентных шумов. Совместная визуализация накопленных спектров всех точек профиля в координатах (расстояние-частота) с отображением амплитуд в соответствии с цветовой шкалой позволяет идентифицировать стоячие волны на собственных частотах объекта и проанализировать их формы. Аномалии в распределении амплитуд вдоль профиля стоячих волн позволяют судить о наличии дефектов в конструкции моста, либо о нарушении его устойчивости, например, из-за оттаивания ММП под мостовыми опорами.

Результаты обработки экспериментальных данных и их обсуждение

Мост на 31-м километре

На рис. 3 изображена схема моста и поле стоячих волн в нем (распределение накопленных амплитудных спектров вдоль моста), в котором можно выделить семь мод стоячих волн, начиная со второй, на собственных частотах моста. Это изгибные стоячие волны, так как регистрация микросейсм проводилась ориенти-

рованными перпендикулярно рельсам горизонтальными геофонами. Для каждой моды между крайними из четырех опор можно видеть несколько интервалов с повышенными амплитудами (пучностями), разделенных низкоамплитудными интервалами в окрестностях узловых точек. Число пучностей на каждой собственной частоте совпадает с номером моды.

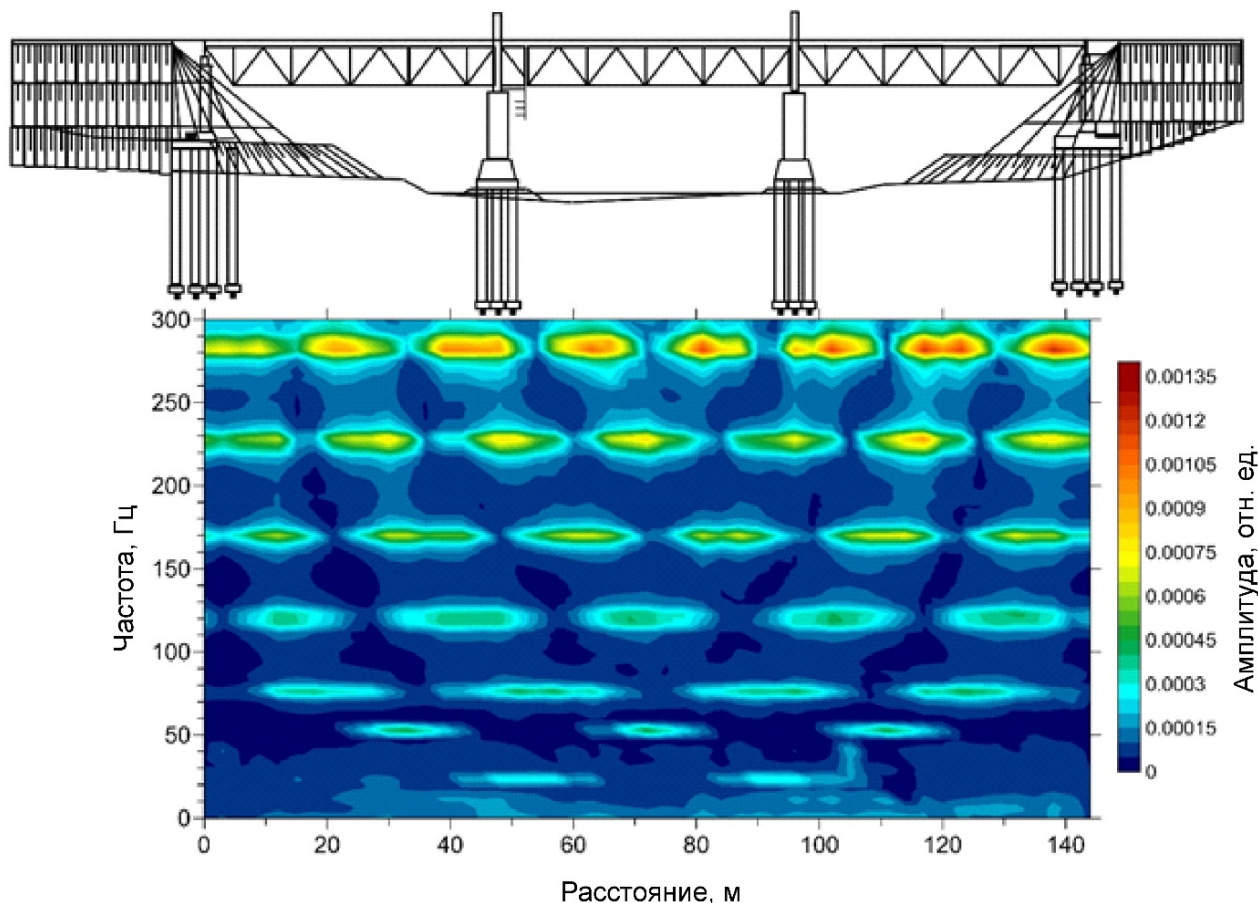


Рис. 3. Схема моста на 31-м км и распределение амплитудных спектров вдоль его длины (в направлении на Бованенково)

Обращает на себя внимание то, что средние опоры практически не влияют на распределение амплитуд вдоль профиля, а именно, не приводят к образованию узлов в местах контакта опор с пролетами моста. Это обусловлено шарнирным, а не жестким типом контактов опор с мостовыми пролетами. Фактически конструкция моста не скреплена с опорами, хороший контакт с ними возникает только при прохождении поезда. Подобный эффект наблюдался в экспериментах с трубопроводом [13], где узлы наблюдались для всех мод только в местах жесткого крепления опор к трубе, но не там, где труба свободно лежала на опоре. Кстати, на рис. 3 видно, что для мод относительно высоких порядков (7-й и 8-й) двум крайним опорам соответствуют все еще повышенные амплитуды, то есть это не узловыe точки. Это объясняется тем, что для этих опор крепления с про-

летом тоже шарнирного типа, а жесткие крепления к твердому грунтовому основанию находятся несколько дальше от центра моста.

В целом же в поле стоячих волн каких-либо осложняющих его существенных аномалий не наблюдается, моды стоячих волн хорошо прослеживаются, распределение пучностей и узлов типично для протяженного объекта, что говорит об отсутствии серьезных нарушений в конструкции моста или снижении его устойчивости.

Мост на 244-м километре

Обследование второго моста проводилось с использованием той же аппаратуры, той же технологии измерения с теми же параметрами дискретизации, накопления сигнала и шага между пунктами наблюдения. Распределение накопленных амплитудных спектров вдоль длины моста приведено на рис. 4. Как можно видеть, здесь также на собственных частотах моста наблюдается чередование пучностей и узлов, причем их число возрастает с повышением порядка моды и, соответственно, собственной частоты.

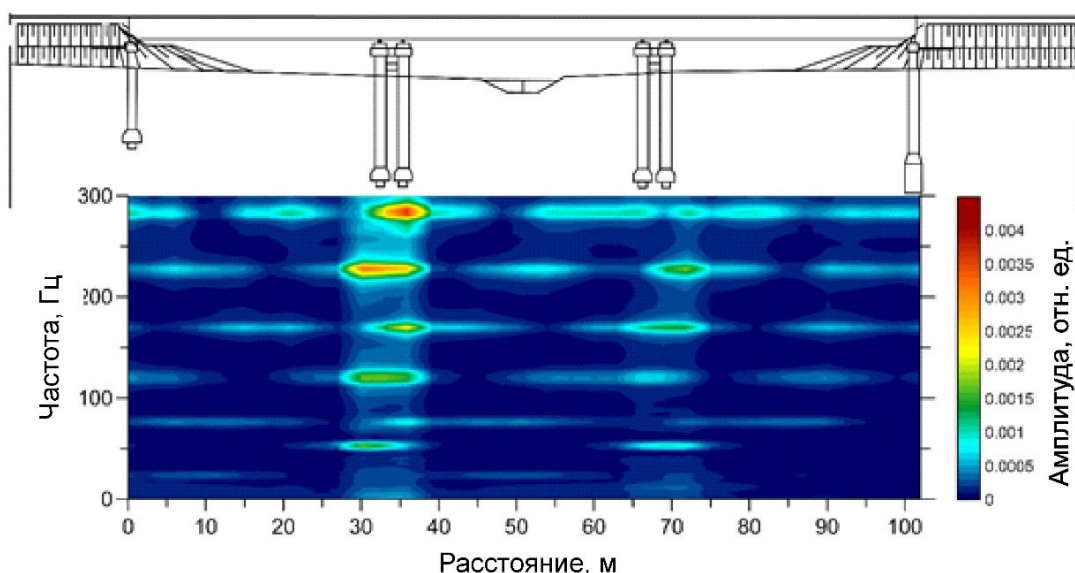


Рис. 4. Схема моста на 244-м км и распределение амплитудных спектров вдоль его длины (в направлении на Бованенково)

Крайняя правая опора, как и в случае моста на 31-м км, не является чисто узловой точкой из-за шарнирного крепления с пролетом, для мод высоких порядков здесь не наблюдаются минимумы амплитуд стоячих волн. Еще сильнее этот эффект выражен над крайней левой опорой, что говорит о том, что место жесткого крепления здесь находится существенно дальше, чем для крайней правой опоры.

Еще одна ярко выраженная особенность распределения спектров для этого моста — значительно повышенные амплитуды в местах контакта пролетов с двумя средними опорами. Предположительно это может быть связано с частичной потерей устойчивости этих опор из-за оттаивания ММП под ними. Более

сложный характер поля стоячих волн в данной мостовой конструкции по сравнению с мостом на 31-м км свидетельствует о необходимости его более тщательного обследования и, возможно, проведения работ по восстановлению устойчивости двух центральных опор.

Заключение

В результате исследований объектов транспортной инфраструктуры, расположенных в зоне распространения ММП, показано, что пассивный сейсмический метод стоячих волн позволяет оценивать техническое состояние мостовых конструкций на предмет их устойчивости и качества крепления пролетов к мостовым опорам. Анализ форм стоячих волн, выделенных из микросейсмических колебаний в результате накопления их амплитудных спектров, показал, что для устойчивой конструкции (мост на 31-м км железной дороги «Обская – Бованенково») формы собственных изгибных колебаний не осложнены существенными аномалиями, распределение пучностей и узлов типично для протяженного объекта. Появление осложняющих аномалий (мост на 244-м км) свидетельствует об изменениях в конструкции моста и/или его основании. В дальнейшем предполагается сопоставить полученные результаты с результатами электротомографии, также проведенной возле этих объектов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Проект № 22-29-00289).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Biscarini C., Catapano I., Cavalagli N., Ludeno G., Pepe F. A., Ubertini F. UAV photogrammetry, infrared thermography and GPR for enhancing structural and material degradation evaluation of the Roman masonry bridge of Ponte Lucano in Italy // *NDT&E International*. – 2020. – Vol. 115. – 102287.
2. Graves W., Aminfar K., Lattanzi D. Full-Scale highway bridge deformation Tracking via photogrammetry and remote sensing // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. – 2767.
3. Kwiatkowski J., Anigacz W., Beben D. A Case Study on the Noncontact Inventory of the Oldest European Cast-iron Bridge Using Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetric Techniques // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12. – 2745.
4. Ghosh D., Gupta H., Mittal A. K. Non-destructive Evaluation of Historic Masonry Structures Using Infrared Thermography and GPR / In book: *Advances in Non Destructive Evaluation*. – P. 315–327.
5. Ходяков В. А., Кулан А. В., Савина Е. Н., Бойко И. Л., Гречухин В. А. Диагностика участков мостового полотна и подходов в зонах устройства деформационных швов на автодорожных мостах // *Наука и техника*. – 2021. – Т. 20. – № 1. – С. 10–15.
6. Bianchini Ciampoli L., Calvi A., Di Benedetto A., Fiani M., Gagliardi V. Ground Penetrating Radar (GPR) and Mobile Laser Scanner (MLS) technologies for non-destructive analysis of transport infrastructures // *Proc. SPIE 11863, Earth Resources and Environmental Remote Sensing / GIS Applications XII*. – 2021.
7. D’Amico F., Gagliardi V., Bianchini Ciampoli L., Tosti F. Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges / *NDT&E International*. – 2020. – Vol. 115. – 102291.

8. Macchiarulo V., Milillo P., Blenkinsopp C., Giardina G. Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series // *Structural Health Monitoring*. – 2022. – Vol. 21. – No 4. – P. 1849–1878.
9. Kaloop M. R., Kimd K. H., Elbeltagif 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 Journal of Civil Engineering*. – 2020. – Vol. 24. – No 5. – P. 1593–1606.
10. Углова Е. В., Еганян Г. В. Вибродиагностика мостовых сооружений на автомобильных дорогах // *Молодой исследователь Дона*. – 2021. – № 2(29). – С. 59–63.
11. Еманов А. Ф., Бах А. А., Клещин В. И. Стоячие волны в плотинах Богучанской и Чиркейской ГЭС // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. – 2018. – № 4 (35). – С. 28–33.
12. Gromyko P. V., Fedin K. V., Seleznev V. S., Kolesnikov Y. I., Ngomayezwe L. Monitoring of the hydraulic units operation of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant using remote seismic observations // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. – 2022. – Vol. 52. – No 2. – P. 335–349.
13. Колесников Ю. И., Федин К. В., Нгомайезве Л. Экспериментальное обоснование применения акустических шумов для диагностирования надземных трубопроводов // *ФТПРПИ*. – 2019. – № 2. – С. 49–58.

© Ю. И. Колесников, К. В. Федин, Д. А. Печенегов, 2023