

К. В. Федин^{1,2,3}✉, А. Л. Лукьянова^{1,3}, А. А. Гриценко^{1,2}, П. С. Осипова¹

Определение технического состояния Ново-Афонского монастыря в Абхазии пассивным микросейсмическим методом на основе выделения стоячих волн в комплексе с методом электротомографии

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

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе исследуется применение пассивного метода стоячих волн для оценки устойчивости строительных конструкций и выявления дефектов конструкций на примере Ново-Афонского монастыря в Абхазии. Этот метод позволяет эффективно локализовать скрытые повреждения в зданиях и на прилегающей территории, а также оценить состояние грунтов на прилегающей территории. Исследования проводились в комплексе с методом электротомографии. Результаты обследования показали, что повышенные амплитуды колебаний в северо-западной части монастыря и в районе разрушенной лестницы связаны с просадкой грунта и обводнением. Анализ данных электротомографии подтвердил наличие аномалий низкого удельного электрического сопротивления, что указывает на повышенное водонасыщение грунтов в этой области. Сопоставление данных сейсмического и геоэлектрического обследования позволило сделать вывод о снижении несущей способности фундамента и ограждающих стен в результате воздействия подземных вод. В результате работы была подтверждена эффективность и необходимость использования пассивного сейсмического метода для мониторинга состояния объектов культурного наследия для своевременного выявления потенциальных угроз и увеличения срока эксплуатации сооружений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, стоячие волны, электротомография

K. V. Fedin^{1,2,3}✉, A. L. Lukyanova^{1,3}, A. A. Gritsenko^{1,2}, P. S. Osipova¹

New Athos Monastery (Abkhazia) technical condition assessment using passive microseismic method based of standing waves extraction with combination of electrical resistivity tomography method

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

² Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Abstract. This study investigates the passive standing wave method for assessing the stability of building structures and identifying structural defects, using the New Athos Monastery in Abkhazia as a case study. This method effectively locates hidden damage in the buildings and evaluates soil

conditions in the surrounding area. The research was conducted alongside electrical resistivity tomography. The survey results revealed that increased vibration amplitudes in the northwestern part of the monastery and near the destroyed staircase are linked to soil subsidence and water saturation. An analysis of electrical resistivity tomography data confirmed the presence of low-resistivity anomalies, indicating that groundwater saturation in the soil is heightened in this zone. A comparison of seismic and geoelectric survey data led to the conclusion that the bearing capacity of the foundation and retaining walls has diminished due to the influence of groundwater. The study confirmed the effectiveness and necessity of utilising passive seismic methods to monitor the condition of cultural heritage sites. This approach allows for the prompt identification of potential threats and extends the service life of structures.

Keywords: non-destructive testing, standing waves, electrical resistivity tomography

Введение

Объекты культурного и исторического значения требуют обследования их технического состояния и оценки возможности дальнейшей эксплуатации [1]. Время и природные факторы являются основными причинами разрушения каменных и кирпичных конструкций. Для своевременного выявления потенциальных структурных повреждений и оценки безопасности эксплуатации требуется проведение периодического обследования состояния конструкций [2,3,4]. На сегодняшний день используются различные методы для мониторинга состояния зданий. Важным ограничением при выборе метода диагностики является возможность проведения обследования во время эксплуатации объекта.

Наиболее популярными неразрушающими методами при обследовании зданий и сооружений являются лазерное сканирование [5] и фотограмметрия, которые позволяют получить геометрическую информацию об объекте исследования. Эти методы часто используются в комплексе, поскольку фотограмметрия применяется для обследования внешних поверхностей конструкции и прилегающей территории, а лазерное сканирование позволяет качественно обследовать здание изнутри. Фотограмметрия часто используется в сочетании с тепловым методом. Тепловизоры позволяют оценить температуру поверхности объекта, поэтому они являются полезным инструментом для обнаружения скрытых трещин в зданиях [6,7].

Для определения устойчивости конструкций на сегодняшний день существует три основных безопасных метода: дистанционное зондирование, мониторинг верхнего слоя земной поверхности и мониторинг объектов с использованием стоячих волн [8,9,10,11].

В инженерной сейсмологии широкое распространение получили стоячие волны. По динамическим параметрам волн возможна локализация неоднородностей и оценка состояния инженерных объектов (плотины, здания, мосты, пустоты и т.д.). Для определения этих параметров используются различные методы, например, возбуждение стоячих волн (собственных колебаний) в зданиях искусственно, с помощью ударов кувалдой [12,13] вынужденных колебаний [14,15] или быстрого снятия нагрузки [16].

Целью данной работы является апробация применения пассивного метода стоячих волн для оценки устойчивости здания и определения местоположения дефектов конструкций на примере обследования Ново-Афонского монастыря и прилегающей территории.

Ранее предложенный метод использовался только для оценки технического состояния мостов [17], поиска дефектов в асфальтовом покрытии дороги [18], мониторинга работы гидроагрегатов на гидроэлектростанции [19], а также для изучения устойчивости надземного трубопровода, закреплённого на опорах [20].

В качестве дополнительного метода обследования прилегающей территории использован метод электротомографии (ЭТ), основанный на разичии горных пород по их удельному электрическому сопротивлению (УЭС) [21].

Объект исследования

Исследования проводились на территории Ново-Афонского монастыря у подножия горы Афон в Абхазии. Монастырь был основан в 1875 г., строительство продолжалось вплоть до 1900 г. В советское время здание использовалось как туристическая база, а с 1924 по 1994 год было заброшено. Во время длительного простоя подземные помещения были полностью затоплены, а в некоторых частях просел грунт. В 1990-х годах монастырь был восстановлен, с 2000 г. по 2010 г. проведена реставрация.

Здания монастыря построены из кирпича и камня. Расположение комплекса на горном склоне увеличивает риск оползней.

Методы и материалы

Пассивный сейсмический метод на основе выделения стоячих волн позволяет локализовать скрытые дефекты, проанализировать остаточный ресурс конструкции и оценить влажность грунта на прилегающей территории. Суть метода заключается в накоплении большого количества амплитудных спектров записей шума, в результате чего на усреднённых (или накопленных) спектрах появляются последовательности пиков, соответствующие семействам стоячих волн разных типов.

Измерения на объекте проводились с использованием сейсмических регистраторов сигналов «Байкал-1» и трёхкомпонентных сейсмических приёмников «GS-ONE LF» (рис. 1а). При проведении съёмки вдоль профиля использовались несколько подвижных и один неподвижный (опорный) регистраторы. Для нормализации уровня шума подвижных датчиков использовались данные от опорного регистратора. Запись осуществлялась путём накопления сигнала – продолжительность непрерывной записи на каждой точке наблюдения составляла 5 минут. Частота измерений составила 500 Гц.

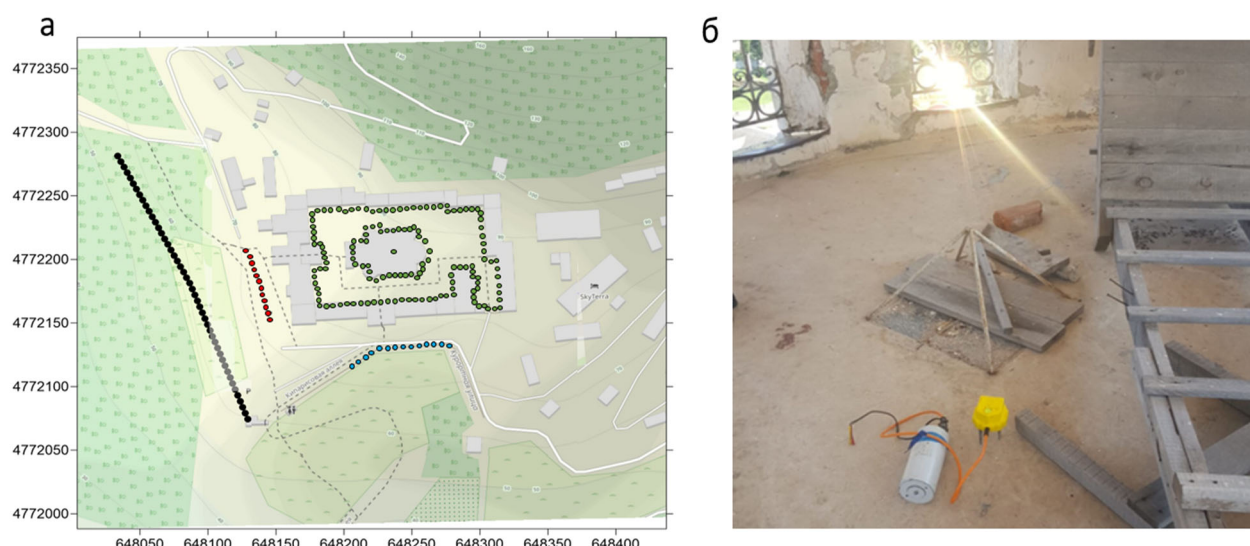


Рис. 1. Схема расположения датчиков сейсмического метода (зеленые точки – по внутреннему периметру монастыря, красные и синие – вдоль ограждающих стен) и профиля электротомографии (черные точки) (а) и цифровой регистратор Байкал-1 и трёхкомпонентный сейсмоприёмник GS-ONE LF на исследуемом объекте (б).

Измерения проводились вдоль замкнутого периметра вокруг храмового комплекса и части прилегающей территории с целью обнаружения просадок и обводнения грунта. На рисунке 1б показана схема установки датчиков на территории монастыря.

Алгоритм выделения стоячих волн из микросейсм следующий:

1. Регистрация записей шума на исследуемом объекте для выделения стоячих волн с использованием геофонов;
2. Нормализация уровня шума подвижных датчиков до опорного уровня для каждого измерения;
3. Разделение записей шума на блоки по 120 секунд;
4. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путём их суммирования;
5. Выделение амплитуды собственных колебаний из амплитудных спектров;
6. Построение карт распределения амплитудно-частотных характеристик на исследуемой площади или профиле.

Интерпретация полученных данных основана на анализе карт распределения амплитудно-частотных характеристик, построенных методом триангуляции с линейной интерполяцией и обобщённого спектра.

Метод электротомографии объединяет в себе методики зондирования и профилирования. Особенности этой модификации являются многоканальные из-

мерения с помощью системы электродов, размещённых вдоль одного профиля на равных расстояниях друг от друга, а также двумерный или трёхмерный математический аппарат инверсии данных.

При исследованиях на территории монастыря профиль электротомографии располагался на склоне ниже здания монастыря, под западной ограждающей стеной (рис. 2).

Измерения проводились с помощью многоканальной электроразведочной станции «Скала-48К12». Последовательность подключения электродов соответствовала установке «Венера-Шлюмберже». Расстояние между электродами составило 5 м, длина профиля – 235 м, глубинность исследований – до 30 м.

Первичная обработка данных ЭТ проводилась в программе Xeris (КБ «Электротометрии»), двумерная обратная задача решена в программе Res2DInv (автор Loke M.H.).

Результаты

По результатам обследования методом выделения стоячих волн периметра здания монастыря и ограждающих стен были построены карты распределения амплитуд собственных колебаний низшей моды (рис. 3). Повышенные значения амплитуд определены в западной и восточной части карты. Наиболее высокие значения маркированы в северо-западном углу карты. На местности в северо-западном углу монастыря обнаружена просадка грунта, а в восточной части – обводнение в подвальном помещении.

По данным измерений вдоль западной ограждающей стены максимальные амплитуды установлены вблизи разрушенной лестницы.

По результатам векторно-поляризационного анализа сейсмических сигналов установлено, что доминирующее направление смещения грунта – юго-запад.

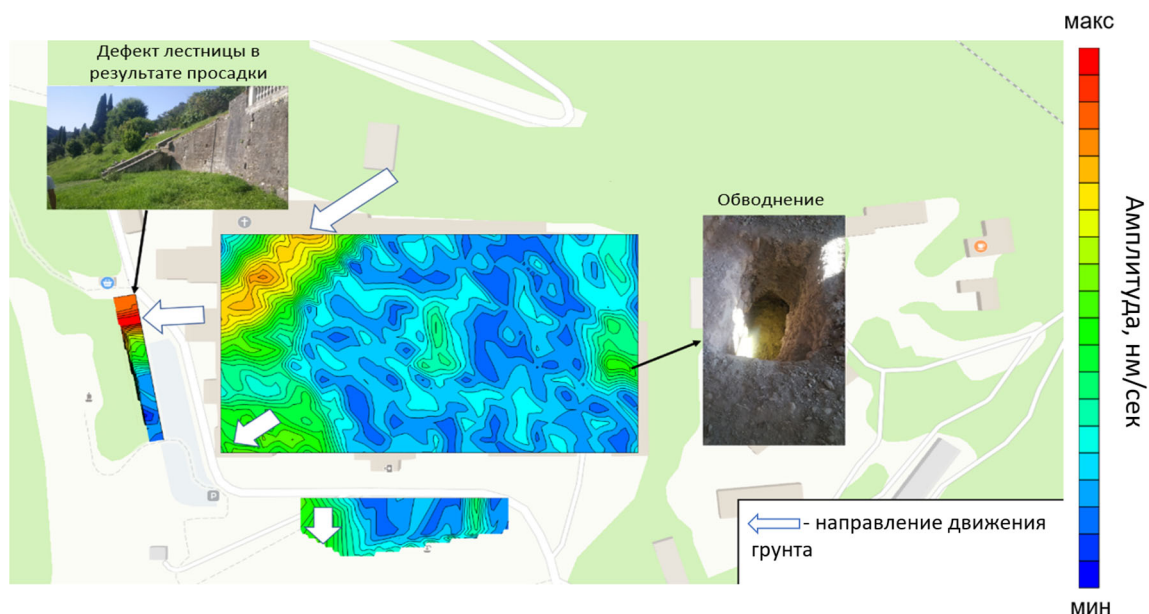


Рис. 3. Карты распределения амплитуды колебаний низшей моды на территории монастыря.

На геоэлектрическом разрезе (рис. 4), полученном по результатам 2-D инверсии данных ЭТ, УЭС варьируется от 0,7 до 300 Ом·м. На большей части разреза сопротивление не превышает 20 Ом·м, что, вероятно, связано с высокой водонасыщенностью грунтов. Аномалии низкого УЭС менее 4 Ом·м выделяются в интервалах 20-30 м, 125-135 м и 165-175 м на глубине 8 м и в интервале 75-85 м на глубине 15 м. В зонах низкого УЭС наблюдаются и аномалии повышенной заряжаемости (m) более 50 мВ/В в интервалах 15-25 м и 80-100 м. Положение низкоомных аномалий на одной глубине и сопровождение их аномалиями повышенной заряжаемости позволяет сделать вывод, что аномалии связаны с металлическими объектами – трубами. Отсутствие аномалий m в интервалах 125-135 м и 165-175 м может объясняться сильной коррозией труб. Расширение низкоомных аномалий вдоль профиля и на глубину связано как с неоднозначностью 2-D инверсии на трёхмерном объекте, так и с тем, что, вероятно, вдоль труб происходит фильтрация подземных вод вниз по склону.

Аномалия высокого УЭС (40-200 Ом·м) на пикетах 40-80 м на глубине 10 м интерпретируется как погребённый разрушенный фундамент лестницы или стены.

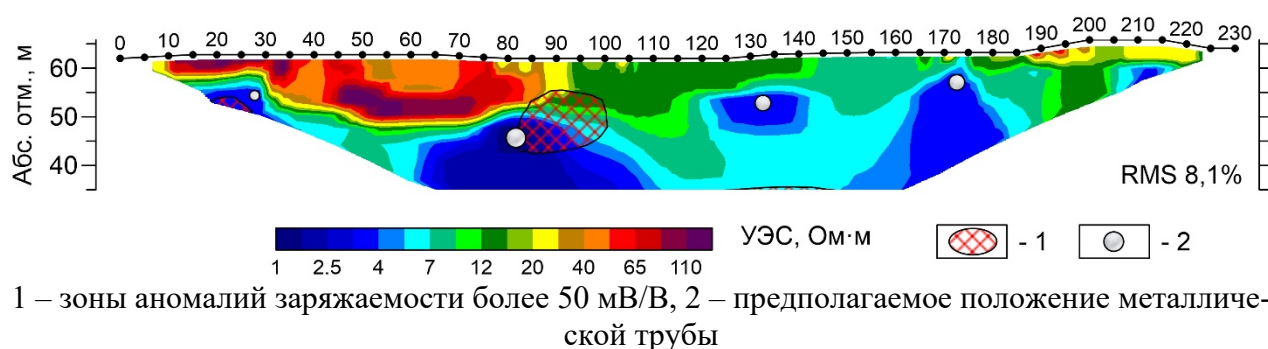


Рис. 4. Геоэлектрический разрез вдоль западной ограждающей стенки монастыря

Сопоставление геоэлектрического разреза и карты амплитуды колебаний вдоль западной стены установлено, что выявленная область высоких амплитуд соотносится с аномалией низкого УЭС в интервале 75-85 м профиля ЭТ.

На основе результатов сейсмического и электрометрического обследования здания монастыря и окрестной территории сделан вывод, что просадки грунта на территории монастыря и повреждения конструкций связаны с обводненностью грунтов.

Заключение

В данной работе представлены результаты апробации пассивного сейсмического метода стоячих волн для обследований конструкций здания Ново-Афонского монастыря и прилегающей территории. По результатам обследования вдоль контура зданий монастыря выявлена зона повышенных амплитуд собственных колебаний в северо-западном углу, связанная с обводнением грунта и

его последующей просадкой. Обследование западной ограждающей стены показало, что наиболее деформированная область расположена ближе к северному углу. Комплексирование результатов с данными ЭТ показало, что зоне аномалий повышенных колебаний соответствует область низкого УЭС. Это подтверждает предположение об обводненности грунтов.

В результате исследований подтверждена эффективность использования пассивного метода стоячих волн для выявления потери устойчивости здания и определения местоположения дефектов конструкции. Водонасыщенный грунт и фундамент приводят к снижению их несущей способности, что, в свою очередь, может приводить к трещинам и разрушениям в фундаменте и стенах. Проведение регулярного обследования объектов культурного и исторического значения неразрушающим методом стоячих волн и реагирование на обнаруженные аномалии позволит сохранить их первозданный вид и увеличить срок службы эксплуатации.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zilbirova, I. Yu., Novoselova, I. V., Al-Fatla, T. N. M. (2021). Organizational and technological approaches to the construction and technical expertise of cultural heritage sites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1083(1), 012058.
2. Entezami, A., Shariatmadar, H., Mariani, S. (2020). Early damage assessment in large-scale structures by innovative statistical pattern recognition methods based on time series modeling and novelty detection. Advances in Engineering Software, 150, 102923.
3. Entezami, H. Shariatmadar, B. Behkamal. A novel double-hybrid learning method for modal frequency-based damage assessment of bridge structures under different environmental variation patterns. Mech. Syst. Signal Process., 201 (2023), Article 110676
4. Deng, Y., Zhao, Y., Ju, H., Yi, T.-H., Li, A. (2024). Abnormal data detection for structural health monitoring: State-of-the-art review. Developments in the Built Environment, 17, 100337.
5. Casula, G., Fais, S., Ligas, P. (2009). An experimental application of a 3D terrestrial laser scanner and acoustic techniques in assessing the quality of the stones used in monumental structures. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 4(1), 45-56.
6. Pappalardo, G., Mineo, S., Calì, D., Bognandi, A. (2022). Evaluation of Natural Stone Weathering in Heritage Building by Infrared Thermography. Heritage, 5(3), 2594-2614.
7. Adamopoulos, E., Colombero, C., Comina, C., Rinaudo, F., Volinia, M., Girotto, M., Ardissono, L. (2021). Integrating multiband photogrammetry, scanning, and gpr for built heritage surveys: the façades of castello del valentino. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, VIII-M-1-2021, 1-8.
8. Liang, Z., Xue, R., Xu, N., Li, W. (2020). Characterizing rockbursts and analysis on frequency-spectrum evolutionary law of rockburst precursor based on microseismic monitoring. Tunnelling and Underground Space Technology, 105, 103564.
9. Kumar, V., Jha, P., Singh, N.P., Cherukuri, S. (2021). Dynamic Stability Evaluation of Underground Powerhouse Cavern Using Microseismic Monitoring. Geotechnical and Geological Engineering, 39, 1795-1815.

10. Ma, K., Wang, S., Yuan, F., Peng, Y., Jia, S. (2020). Study on Mechanism of Influence of Mining Speed on Roof Movement Based on Microseismic Monitoring. *Advances in Civil Engineering*, 2020.
11. Uniyal, A., Shah, P.N., Rao, S.S. (2018). Sectoral Migration of Ganga River and Its Implication on the Stability of Phaphamau Bridge Near Allahabad, U.P., India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 1125-1134.
12. Cheng, M.H., Kohler, M.D., Heaton, T.H. (2006). Prediction of Wave Propagation in Buildings Using Data from a Single Seismometer. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 107-119.
13. Park, S.A., Choi, J.S., Min, K.W. (2011). Dynamic characteristics for traditional wooden structure in Korea by using impact hammer test. *Procedia Engineering*, 14, 477-484.
14. Clinton, J.F., Bradford, S.C., Heaton, T.H., Favela, J. (2006). The observed wander of the natural frequencies in a structure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), 237-257.
15. Zwolski, J., Bien, J. (2011). Modal analysis of bridge structures by means of forced vibration tests. *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(4), 590-599.
16. Robson, B.N., Harik, I.E. (1998). Pullback testing of seismically isolated P/C I-girder bridge. *Journal of Structural Engineering*, 124, 930-937.
17. Fedin, K.V., Olenchenko, V.V., Osipova, P.S., Pechenegov, D.A., Kolesnikov, Yu.I., Ngomayezwe, L. (2023). Assessment of the technical condition of bridges and their ground foundations using the electrical resistivity tomography and the passive seismic standing wave method. *Journal of Applied Geophysics*, 217, 105188.
18. Ngomayezwe, L., Kolesnikov, Y.I., Fedin, K.V. (2022). Diagnostics of asphalt pavement using elastic standing waves. *Near Surface Geophysics*, 20(1), 82-93.
19. Gromyko, P.V., Fedin, K.V., Seleznev, V.S., Kolesnikov, Yu.I., Ngomayezwe, L. (2023). Monitoring of the hydraulic units operation of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant using remote seismic observations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 52, 335-349.
20. Kolesnikov, Yu.I., Fedin, K.V., Ngomaizve, L. (2019). Experimental substantiation of using acoustic noise in above-ground pipeline diagnostics. *Journal of Mining Science*, 55(2), 219-228.
21. Бобачев, А. А., Горбунов, А. А., Модин, И. Н., Шевнин, В. А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. *Приборы и системы разведочной геофизики* – 2006. – Т. 2. – С. 14-17.

© К. В. Федин, А. Л. Лукьянова, А. А. Гриценко, П. С. Осипова, 2025