

К. В. Федин^{1,2,3✉}, О. К. Марилов³, А. Л. Лукьянова^{1,3}

Применение пассивного сейсмического метода стоячих волн для определения технического состояния насыпной плотины в зоне вечной мерзлоты

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. 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 представлены результаты геофизического обследования насыпной каменно-земляной плотины гидроэлектростанции, расположенной в зоне вечной мерзлоты методом пассивного сейсмического мониторинга. В результате обследования были выявлены зоны повышенной динамической активности, связанные с разуплотнением грунта, трещинообразованием. Локализованы аномальные участки с наибольшими смещениями амплитудно-частотных характеристик (скорости вибраций), определены зоны с повышенными значениями напряжённо-деформированного состояния грунта, проведена качественная оценка зон локальных обводнённостей. Работа гидроагрегатов и температурные деформации могут провоцировать непредвиденные резонансы, особенно в зонах с выявленными дефектами. Полученные результаты демонстрируют эффективность пассивных сейсмических методов для мониторинга плотин.

Ключевые слова: пассивная сейсмика, сейсмоэмиссионная томография, мониторинг.

K. V. Fedin^{1,2,3✉}, O. K. Marilov³, A. L. Lukyanova^{1,3}

Integration of the passive seismic standing wave method and the emission tomography method to determine the technical condition of an embankment dam in the permafrost zone

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

² Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk.

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

Abstract. The paper presents the results of a geophysical survey of an embankment rock-earth dam of a hydroelectric power plant located in the permafrost zone using passive seismic monitoring. As a result of the survey, areas of increased dynamic activity associated with soil decompression and cracking were identified. Anomalous areas with the greatest shifts in amplitude-frequency characteristics (vibration rates) were localized, zones with increased values of the stress-strain state of the soil were identified, and a qualitative assessment of local flooding zones was carried out. The operation of hydraulic units and temperature deformations can provoke unforeseen resonances, especially in areas with identified defects. The results obtained demonstrate the effectiveness of passive seismic methods for monitoring dams.

Keywords: passive seismics, emission tomography, monitoring

Введение

На долю гидроэнергетики в России приходится порядка 20% установленной мощности и выработки электроэнергии [1, 2]. Изменение климата оказывает значительное влияние на безопасную эксплуатацию гидротехнических сооружений, расположенных в районах Крайнего Севера. Повышение среднегодовой температуры приводит к таянию вечной мерзлоты, что может ослабить грунтовые основания плотин и других инфраструктурных объектов, приводя к чрезвычайным ситуациям, связанным, например, с ослаблением несущей способности грунтов, появлением трещин в теле плотины, которые в дальнейшем могут привести к возникновению фильтрационных процессов [3, 4] и прорыву плотины. Эти факторы способствуют образованию обширных зон фильтраций, трещин, полостей и других скрытых дефектов в структуре конструкций и грунтов, которые трудно обнаружить традиционными методами [5-8].

Обеспечение безопасности и непрерывной работы гидроэлектростанции требует разработки и внедрения современных методов диагностики и мониторинга. Так, одними из ключевых являются геофизические методы выявления изменений динамических характеристик тела плотины. Сейсмические методы считаются одними из наиболее информативных для обнаружения и оценки зон фильтрации особенно в сложных геологических условиях, таких как многолетнемерзлые грунты [9-15].

Методы и материалы

Объектом исследования являлась каменно-земляная плотина ГЭС, расположенная в зоне вечной мерзлоты на многолетнемерзлых грунтах. Тело плотины представляет собой камень различных фракций со стороны верхнего бьефа и свайное поле со стороны нижнего бьефа.

Обследование проводилось пассивным сейсмическим методом стоячих волн, основанным на регистрации записей сейсмических колебаний объекта. Источником колебаний являлись гидроагрегаты, работающие с постоянной частотой.

Каждая конструкция имеет свои собственные частоты, зависящие от геометрии, материала, массы и условий закрепления. Если частота внешних воздействий совпадает с собственной частотой конструкции, возникает явление резонанса, что может привести к значительным колебаниям и разрушению конструкции. Так, при наличии дефекта (трещины, полости и др.), он также будет иметь собственную частоту.

При проведении обследования использовались регистраторы сейсмических сигналов D-REG с низким уровнем внутреннего шума [16] и трёхкомпонентные велосиметры высокой чувствительности GS20DX. Измерения проводились по всей длине плотины.

Алгоритм выделения стоячих волн из микросейсм состоит в следующем:

1. Регистрация когерентных «паразитных» шумов, для их последующего учёта при обработке полученных данных;
2. Регистрация шумовых записей на исследуемом участке местности для выделения в них стоячих волн с использованием семи датчиков: одного статично зафиксированного в одной точке и шести перемещаемых;
3. Нормировка уровня шумов перемещаемых датчиков на уровень опорного для каждого измерения;
4. Разбиение шумовых записей на блоки;
5. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путём их суммирования;
6. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади или профиле.

Площадные измерения

По заранее спланированной системе наблюдений проводилась расстановка шести перемещаемых датчиков, а затем замер отклика среды в течении трех минут. Пример съёмки данных перемещаемыми датчиками согласно спланированной системе наблюдений приведён на рис. 1. После успешной процедуры проведения замера производилась перестановка датчиков согласно системе наблюдений и процесс повторялся вплоть до окончания работ.



Рис. 1. Пример расстановки перемещаемых датчиков согласно системе наблюдений

Обследование проводилось по следующей системе наблюдений (рис. 2). Шаг сети наблюдений по оси X составлял 3 м, однако, ввиду присутствия аномальных пьезометрических показателей, полученных при фильтрационных наблюдениях перед сейсмическими обследованиями, некоторые участки проходились более плотной сетью наблюдений (1 м по оси Y). Всего было реализовано 792 точки наблюдения.

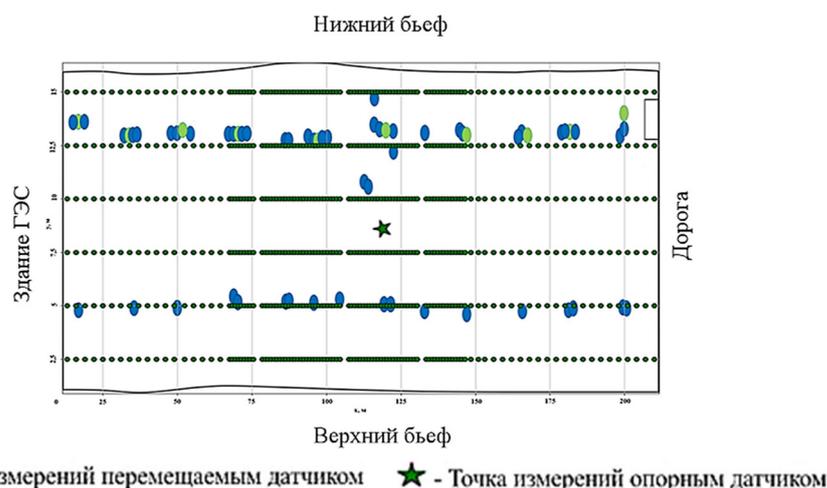


Рис. 2. Схема расстановки опорного и перемещаемых сейсмодатчиков согласно схеме каменно-земляной плотины (вид сверху)

Результаты

Ниже представлена амплитудно-частотная карта колебаний по оси Y с отображением локализованных зон повышенных значений колебаний в нанометрах (рис. 3).

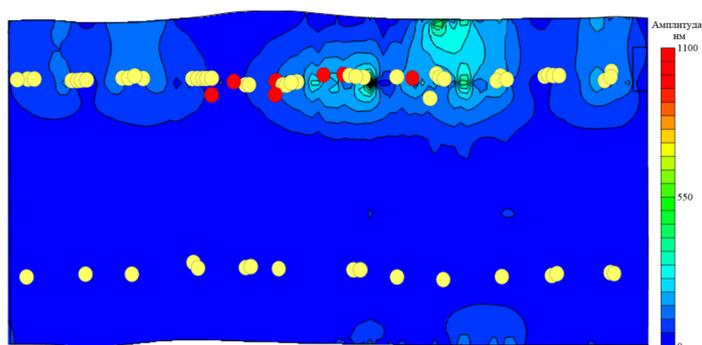


Рис. 3. Локализация зон повышенных значений амплитуд

Данная карта амплитудно-частотных колебаний по оси Y демонстрирует пространственное распределение амплитуд в нанометрах с использованием цветовой шкалы, где красные зоны соответствуют максимальным значениям, а синие – минимальным. На карте также показана схема расположения пьезометров, где красным цветом отмечены пьезометры с аномальными показателями уровня воды, желтым – с нормальными.

Наличие обширной зоны повышенных значений амплитуд, смещенной к нижнему бьефу, свидетельствует о повышенной динамической активности, связанной, вероятно, с разуплотнением грунта или трещинообразованием.

Местами красные метки пьезометров (аномальные уровни воды) совпадают с зонами возникновения повышенного числа резонансных явлений, подтверждая связь фильтрационных процессов с механическими деформациями.

В данном случае коэффициентом Пуассона является отношение скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s приповерхностных грунтов (глубина до 30 м).

Ниже представлены изображения локальных зон обводнённости, полученных с помощью коэффициента Пуассона (качественная оценка) с использованием метода стоячих волн (рис. 4)

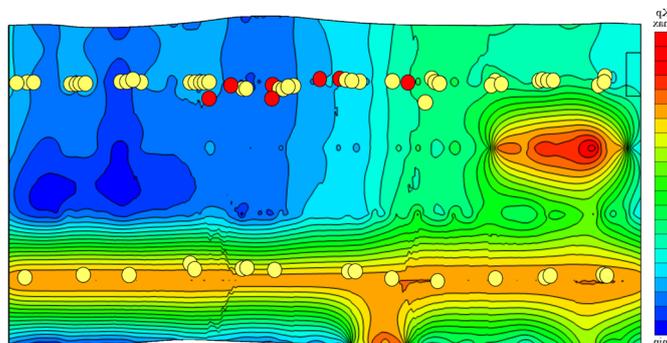


Рис. 4. Локализация зон повышенных значений обводнённости по коэффициенту Пуассона (качественная оценка)

Поскольку это качественная оценка на цветовой шкале справа красным цветом отображены наиболее обводнённые участки, синим – наименее. Ранее упоминалось, что в теле плотины находится бетонная стена, которую можно видеть в нижней части карты оранжевым цветом. Однако, наличие одводненного участка в правой части плотины может указывать на деградацию противодиффузионного экрана на данном участке. Наличие сезонных перепадов температур в регионе обследования приводит к накоплению воды и, как следствие, возникновению достаточно обширной области повышенных значений обводнённости.

Карта суммарных колебаний по трём осям со связанным по значениям амплитуд спектром представлена на рис. 5.

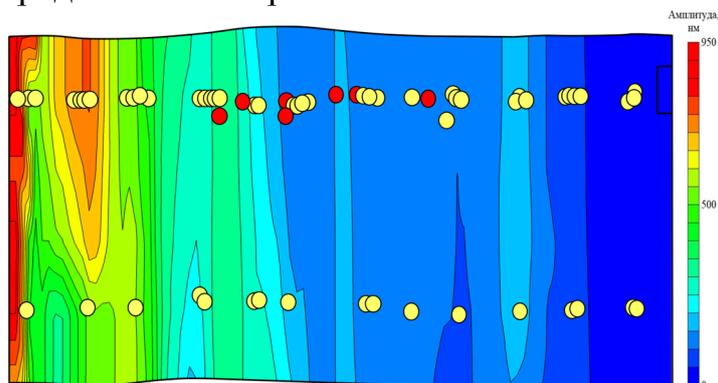


Рис. 5. Локализация зон повышенных значений амплитуд (суммарные колебания по трём осям)

Данное распределение амплитуд является нормальной картиной затухания упругих волн в теле плотины, поэтому в силу присутствия здания ГЭС в левой части рисунка с работающими гидроагрегатами, расположенными в здании и являющимися в том числе источниками колебаний, красная зона смещена в сторону здания ГЭС.

Для того, чтобы оконтурить сваи был применён расчёт диапазона частот (в данном случае составлявший 65 – 90 Гц) (рис. 3.1.6) из заранее известных длин свай согласно проекту (от 60 метров с убыванием ближе к берегу с дорогой) по следующей формуле [17]:

$$v = \frac{V_p}{2h} \quad (1)$$

где, v – частота продольной волны, V_p – скорость распространения продольной волны в исследуемой среде, h – длина свай.

Оконтуренные сваи со связанным по значениям амплитудным спектром, расположенные внутри насыпной плотины, отображены на рис. 6.

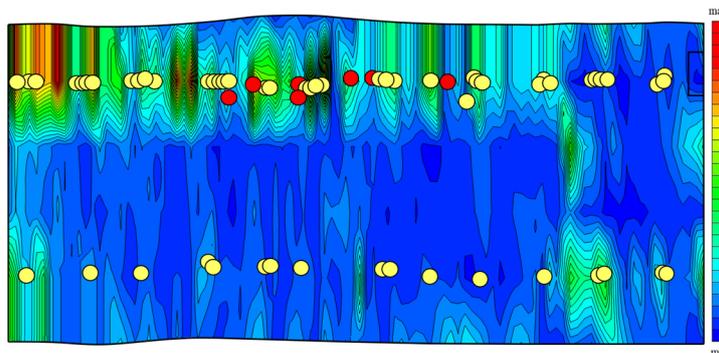


Рис. 6. Локализация зон, соответствующих расположению свай согласно схеме внутри каменно-земляной плотины

Расположение свай со стороны нижнего бьефа подтверждает данная картина распределений. Амплитудный спектр также демонстрирует наличие свай на картине амплитудного распределения.

Наличие включений зелёного цвета в верхней части карты говорит о наличии аномальных зон в данном диапазоне частот, что может указывать на возникновение повышенного числа резонансных явлений на данных участках, связанных с наличием скрытых дефектов.

Выводы

В результате комплексного обследования каменно-земляной плотины в зоне вечной мерзлоты методом пассивного сейсмического мониторинга были выявлены зоны повышенной динамической активности, связанные с разуплотнением грунта, трещинообразованием и резонансными явлениями. Наибольшая ампли-

туда колебаний по оси Y смещена к нижнему бьефу, что коррелирует с аномальными показателями уровня воды

Работа гидроагрегатов создаёт направленные колебания, имеющие наибольшие амплитудные значения вблизи здания ГЭС, а амплитудный спектр демонстрирует логарифмическое затухание волн, характерное для конструкции плотины. Смещение собственных частот ГЭС из-за температурных деформаций может провоцировать непредвиденные резонансы, особенно в зонах скрытых дефектов.

Полученные результаты демонстрируют эффективность пассивных сейсмических методов для мониторинга каменно-земляной плотины в условиях Крайнего Севера. Выявленные риски требуют внедрения систем непрерывного контроля, адаптированных к климатическим и геологическим особенностям региона.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кривошеков, Д. П. ЕДИНЫЙ ЭНЕРГОРЫНОК РОССИИ И БЕЛОРУССИИ В РАМКАХ ИНТЕГРАЦИИ ЕВРАЗИЙСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОЮЗА. *Journal of Monetary Economics and Management*. – 2024(2), 84-85.
2. Соловьёва, Ю. В., & Бадалзода, С. (2024). «Зеленая» энергетика как тренд развития в мире и в России: перспективы и возможности. *Россия и Азия*, (3), 29.
3. Erpicum, S., Crookston, B. M., Bombardelli, F., Bung, D. B., Felder, S., Mulligan, S., ... & Palermo, M. (2021). *Hydraulic structures engineering: An evolving science in a changing world*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(2), e1505.
4. Murton, J. B. (2021). Permafrost and climate change. In *Climate change* (pp. 281-326). Elsevier.
5. Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety: technical problems of ageing concrete dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10(6), 241-279.
6. Narita, K. (2000). *Design and construction of embankment dams*. Dept. of Civil Eng., Aichi Institute of Technology.
7. Sjö Dahl, P., Dahlin, T., Johansson, S., & Loke, M. H. (2008). Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4), 155-164.
8. Andersen, G. R., Cox, C. W., Chouinard, L. E., & Hover, W. H. (2001). Prioritization of ten embankment dams according to physical deficiencies. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(4), 335-345.
9. Li, S., Lai, Y., Zhang, M., & Yu, W. (2015). Seasonal differences in seismic responses of embankment on a sloping ground in permafrost regions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 76, 122-135.
10. Quinn, M. C., Wagner, A. M., Engel, C. S., Winters, K. E., Coclin, C. G., & Picucci, J. R. *Distributed Fiber Optic Sensing in Cold Regions*. In *Geo-Congress 2024* (pp. 536-544).
11. Fedin, K. V., Kolesnikov, Y. I., & Ngomayezwe, L. (2022). Determination of Cavities Under the Concrete Slab Anchoring the Upper Slopes of the Novosibirsk Hydroelectric Power Station Using Standing Waves. *Processes in GeoMedia—Volume IV*, 1-8.

12. Бах, А. А., Еманов, А. Ф., & Клёцин, В. И. (2018). Изучение плотины Богучанской ГЭС методом стоячих волн. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 3, 138-144.
13. Еманов, А. Ф., Селезнёв, В. С., Бах, А. А., & Красников, А. (2012, April). Метод стоячих волн в инженерной сейсмологии. In 8th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics 2012 (pp. ср-284). European Association of Geoscientists & Engineers.
14. Fedin, K. V., Kolesnikov, Y. I., & Ngomayezwe, L. (2021). Mapping of underground cavities by the passive seismic standing waves method: the case study of Barsukovskaya cave (Novosibirsk region, Russia). *Geophysical Prospecting*, 69(1), 167-179.
15. Fedin, K. V., Kolesnikov, Y. I., & Ngomayezwe, L. (2022). Determination of ice cover thickness using compression standing waves. *Cold Regions Science and Technology*, 198, 103552.
16. 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. P. 1-5
17. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.

© К. В. Федин, О. К. Марилов, А. Л. Лукьянова, 2025