

Б. Биханга¹✉

Интегрированный анализ пьезометрических и геодезических данных для мониторинга деформаций плотин

¹Государственный университет по землеустройству, г. Москва, Российская Федерация
e-mail: bihangab@gmail.com

Аннотация. В статье представлена методика интегрированного анализа долгосрочных пьезометрических и геодезических данных для исследования деформационных процессов гидротехнических сооружений на примере плотины Рвегура (Республика Бурунди). Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения информативности мониторинга за счет интеграции различных типов измерений и возможности непрерывного контроля состояния сооружения между периодическими геодезическими циклами. Результаты 26-летних наблюдений (1992 – 2018 гг.) выявили выраженную асимметрию в распределении порового давления и горизонтальных смещений между правобережной и левобережной частями плотины. Правобережный профиль характеризовался максимальными значениями порового давления (380–600 мбар в начальный период) и наиболее интенсивными деформациями (до 30 мм при скорости 1,6 мм/год), тогда как левобережная часть демонстрировала минимальные показатели. Установлены корреляционные зависимости между пьезометрическими уровнями и деформациями с коэффициентами корреляции 0,72–0,91 для правобережной и центральной частей плотины, что позволяет использовать пьезометрические данные в качестве предварительного индикатора возможных деформаций. Предложенный подход включает построение регрессионных моделей для каждого профиля с учетом выявленных корреляционных зависимостей и обеспечивает повышение точности прогнозирования деформационных процессов. Методика может применяться для интерполяции данных в промежутках между геодезическими циклами наблюдений, что особенно важно для раннего выявления аномальных процессов и своевременного принятия управленческих решений по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: пьезометрический мониторинг, геодезические наблюдения, деформации плотин, интерполяция данных, корреляционный анализ, гидротехнические сооружения

В. Bihanga¹✉

Integrated Analysis of Piezometric and Geodetic Data for Monitoring Dam Deformations

¹State University of Land Management, Moscow, Russian Federation
e-mail: bihanab@gmail.com

Abstract. The article presents a methodology for integrated analysis of long-term piezometric and geodetic data for investigating deformation processes of hydraulic structures using the Rwegura dam (Republic of Burundi) as an example. The relevance of the study is determined by the need to enhance monitoring effectiveness through integration of different measurement types and the possibility of continuous condition monitoring between periodic geodetic observation cycles. The results of 26 years of observations (1992–2018) revealed a pronounced asymmetry in the distribution of pore pressure and horizontal displacements between the right bank and left bank parts of the dam. The right bank profile was characterized by maximum pore pressure values (380–600 mbar in the initial period)

and the most intensive deformations (up to 30 mm at a rate of 1.6 mm/year), while the left bank part demonstrated minimal indicators. Correlation dependencies between piezometric levels and deformations were established with correlation coefficients of 0.72-0.91 for the right bank and central parts of the dam, which allows the use of piezometric data as a preliminary indicator of possible deformations. The proposed approach includes the construction of regression models for each profile taking into account the identified correlation dependencies and provides improved accuracy in predicting deformation processes. The methodology can be applied for data interpolation in the intervals between geodetic observation cycles, which is especially important for early detection of anomalous processes and timely decision-making to ensure the safety of hydraulic structures.

Keywords: piezometric monitoring, geodetic observations, dam deformations, data interpolation, correlation analysis, hydraulic structures

Введение

Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений требует применения комплексного подхода к мониторингу их технического состояния. Традиционные геодезические методы наблюдений за деформациями, несмотря на высокую точность, ограничены дискретностью измерений и не позволяют осуществлять непрерывный контроль за процессами, происходящими в теле и основании плотины между циклами наблюдений. В то же время пьезометрические наблюдения обеспечивают постоянный мониторинг порового давления, которое является важнейшим индикатором напряженно-деформированного состояния сооружения.

Настоящее исследование направлено на разработку методики интегрированного анализа пьезометрических и геодезических данных, позволяющей использовать результаты пьезометрических наблюдений для интерполяции деформационных процессов в промежутках между циклами геодезических измерений. Объектом исследования является плотина Рвегура в Республике Бурунди, для которой накоплены долгосрочные ряды наблюдений протяженностью более 26 лет.

Методы и материалы

Исследование базируется на анализе данных четырех пьезометрических профилей (P100, P140, P180, P200), установленных на правом берегу, в центре и на левом берегу плотины. Глубина установки пьезометров варьируется от 2089,5 м до 2126,12 м. Одновременно с пьезометрическими наблюдениями выполнялись геодезические измерения горизонтальных смещений гребня и нижней части плотины [1].

Для установления взаимосвязи между пьезометрическими и деформационными данными применялся корреляционный анализ. Вычислялись коэффициенты корреляции Пирсона между пьезометрическими уровнями, уровнем воды в водохранилище и горизонтальными смещениями для каждого профиля. Полученные коэффициенты корреляции визуализировались в виде тепловых карт для выявления пространственных закономерностей [9].

Временной анализ включал построение трендов изменения пьезометрических уровней и смещений с определением скоростей изменений и коэффициен-

тов детерминации. Это позволило выявить устойчивые тенденции в развитии деформационных и фильтрационных процессов [4, 10].

Результаты

Результаты пьезометрических наблюдений.

Анализ пьезометрических данных за период 1992-2018 гг. выявил существенную асимметрию в распределении порового давления. Правобережный профиль Р100 характеризовался максимальными значениями (380-600 мбар в начальный период), тогда как левобережные профили Р180 и Р200 демонстрировали значительно меньшие значения (150-300 мбар и 100-220 мбар соответственно). К 2018 году произошло снижение давления во всех профилях: Р100 – до 50-150 мбар, Р140 – до 70-120 мбар, Р180 – до 30-70 мбар, Р200 – до 20-50 мбар.

Корреляционный анализ между уровнем воды в водохранилище и пьезометрическими показаниями выявил высокие коэффициенты корреляции для правобережного профиля Р100 (0,78-0,91), умеренные значения для центрального профиля Р140 (0,60-0,89) и более низкие для левобережного профиля Р200 (0,55-0,78). Это указывает на различную степень гидравлической связи различных зон плотины с водохранилищем [5].

Результаты геодезических наблюдений.

Геодезический мониторинг за период 1992-2015 гг. подтвердил асимметрию в деформационном поведении плотины. Наиболее интенсивные смещения наблюдались в правобережной части (профиль Р100): смещение гребня в верховую сторону достигло 30 мм при скорости 1,6 мм/год ($R^2 = 0,793$), смещение низовой части составило 17 мм при скорости 0,8-0,9 мм/год ($R^2 = 0,721$). Левобережный профиль Р200 характеризовался минимальными смещениями: гребень – 9 мм при скорости 0,5 мм/год ($R^2 = 0,762$), низовая часть – не более 5 мм.

Характерной особенностью является начало значимых деформаций с запозданием относительно ввода плотины в эксплуатацию: для правобережной части – с 1995 года (через 9 лет), для левобережной – с 1998 года (через 12 лет), что свидетельствует о постепенном развитии процессов консолидации и перераспределения напряжений [2, 7].

Корреляционные зависимости между пьезометрическими и деформационными данными.

Установлена выраженная корреляционная связь между пьезометрическими уровнями и смещениями гребня плотины. Для верховых смещений гребня характерна отрицательная корреляция с пьезометрическими уровнями, для низовых смещений – положительная. Наиболее сильная связь выявлена для профиля Р100: коэффициенты корреляции достигают -0,88 для верховых смещений и 0,90 для низовых. Профиль Р140 демонстрирует значения -0,72 и 0,91 соответственно. Левобережные профили характеризуются менее выраженной корреляцией, особенно Р180 для низовых смещений (0,16-0,42).

Выявленная закономерность отражает физический механизм взаимодействия: повышение порового давления приводит к усилению сдвиговых деформаций в сторону нижнего бьефа и уменьшению деформаций в сторону верхнего

бьефа. Высокие коэффициенты корреляции ($R > 0,85$) для правобережной и центральной частей плотины свидетельствуют о возможности использования пьезометрических данных для прогнозирования и интерполяции деформационных процессов [3, 6].

Обсуждение

Установленная взаимосвязь между пьезометрическими и геодезическими данными открывает возможность для разработки интегрированного подхода к мониторингу деформаций плотин. Пьезометрические измерения, выполняемые с высокой частотой (ежедневно или еженедельно), могут служить предварительным индикатором развития деформационных процессов и использоваться для интерполяции данных между периодическими геодезическими циклами измерений.

Предлагаемая методика включает следующие этапы:

- установление корреляционных зависимостей между пьезометрическими уровнями и деформациями на основе синхронных данных;
- построение регрессионных моделей для каждого профиля с учетом выявленных коэффициентов корреляции;
- использование текущих пьезометрических данных для оценки ожидаемых деформаций в промежутках между геодезическими циклами;
- верификация прогнозных значений по результатам последующих геодезических измерений.

Наблюдаемая асимметрия в поведении различных участков плотины требует дифференцированного подхода к применению методики. Для правобережной части плотины, где коэффициенты корреляции достигают 0,88-0,91, интерполяция на основе пьезометрических данных обеспечивает высокую точность. Для левобережной части с более низкими коэффициентами корреляции целесообразно применение более консервативных подходов с расширенными доверительными интервалами [8].

Выявленное снижение пьезометрического давления с течением времени при относительно стабильном уровне воды в водохранилище свидетельствует о развитии процессов самоуплотнения грунта и кольматации фильтрационных путей. Это сопровождается ослаблением корреляционной связи между уровнем воды и пьезометрическими показаниями, что указывает на возрастание роли необратимых изменений. Данный факт необходимо учитывать при долгосрочном прогнозировании, периодически актуализируя корреляционные модели.

Заключение

Результаты 26-летних наблюдений на плотине Рвегура подтверждают наличие устойчивой взаимосвязи между пьезометрическими уровнями и деформационными процессами, что обосновывает возможность использования пьезометрических данных для прогноза и выявления возможных деформаций. Установлены высокие коэффициенты корреляции между пьезометрическими уровнями и смещениями для правобережной (0,88-0,90) и центральной (0,72-0,91) частей плотины, что

позволяет применять метод прогноза с высокой точностью для этих зон. Выявленная пространственная неоднородность корреляционных зависимостей требует дифференцированного подхода к применению методики интерполяции для различных участков сооружения. Предложенная методика интегрированного анализа обеспечивает повышение информативности мониторинга и может применяться для раннего выявления аномальных деформационных процессов в промежутках между геодезическими циклами наблюдений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биханга Б. Анализ деформационных процессов на плотине рвегура с помощью пьезометрических измерений в Республике Бурунди // Успехи современного естествознания (Advances in Current Natural Sciences). 2024. № 5. С. 116–120.
2. Григорьев Д. О., Ащеулов В. А. Анализ геодезических методов деформационного мониторинга гидротехнических сооружений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. № 1 (6). С. 114–118.
3. Джамил А. Ф. Х., Газизович М. М. Методика оценки деформаций водоподпорных плотин // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. № 1 (26). С. 45–56.
4. Иващенко И. Н., Гончаров М. А. Безопасность и риск эксплуатируемых сооружений: методология оперативной оценки // Проблемы анализа риска. 2022. № 6 (18). С. 66–83.
5. Саямова К. Д., Руми Д. Ф. Динамика грунтового гидротехнического сооружения с учетом реологических свойств грунта // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2015. № 3. С. 31–35.
6. Ханнанов Р. Р. Анализ результатов геодезических измерений на гидротехнических сооружениях // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 4–3. С. 96–100.
7. Шоломицкий А. А., Ханнанов Р. Р., Тутанова М. С. Методика геодезического мониторинга за насыпными гидротехническими сооружениями // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2023. № 5 (28). С. 25–32.
8. Kim J.-M., Lee J. Time series analysis for evaluating hydrological responses of pore-water pressure to rainfall in a slope // Hydrological Sciences Journal. 2017. № 9 (62). С. 1412–1421.
9. Pirti A., Hosbas R. G. Evaluation of some levelling techniques in surveying application // Geodesy and Cartography. 2019. № 2 (68).
10. Su Y. [и др.]. Dam deformation interpretation and prediction based on a long short-term memory model coupled with an attention mechanism // Applied Sciences. 2021. № 14 (11). С. 6625.

© Б. Биханга, 2026