

СТАТЬЯ

УДК 528.48:626/627
DOI 10.17513/use.38275

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПЛОТИНЕ РВЕГУРА С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ

Биханга Бьенвену

*ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», Москва,
e-mail: bihangab@gmail.com*

В данной статье представлены пьезометрические данные по плотине Рвегура в Республике Бурунди с 1992 по 2018 г. с еженедельными показаниями. В результате анализа данных подчеркиваются различия в показаниях пьезометров на разных сторонах насыпи, которые значительно отличаются для левой и правой сторон. Электроэнергия, вырабатываемая ГЭС Рвегура, важна для национальной экономики и необходима для жизнеобеспечения и развития страны. Республика Бурунди имеет долгую историю обеспечения электроэнергией населения и промышленности. Рельеф Республики Бурунди варьируется от уровня озера Танганьика, самая низкая точка которого находится на высоте около 775 м, до самой высокой горы, горы Хега, высота которой составляет 2670 м. Таким образом, в топографии страны преобладают холмы, горы и равнины, что обеспечивает большой перепад высот, благоприятствующий использованию гидравлической энергии. Регулярный мониторинг системы измерений и контроля показал, что уровень грунтовых вод в левой стене ниже по течению от плотины практически не изменился, в то время как в правой части он поднялся от минимального до максимального своего значения.

Ключевые слова: пьезометрические измерения, давление, мониторинг, гидротехнические сооружения, плотина, деформация, уровня воды

ANALYSIS OF DEFORMATION PROCESSES ON THE RWEGURA DAM USING PIEZOMETRIC MEASUREMENTS IN THE REPUBLIC OF BURUNDI

Bikhanga Bienvenu

State University of Land Use Planning, Moscow, e-mail: bihangab@gmail.com

This paper presents a comprehensive analysis of piezometric data for the Rwegura dam in the Republic of Burundi from 1992 to 2018, with weekly readings. The data analysis reveals significant differences in piezometer readings on different sides of the embankment. These differences are particularly pronounced on the left and right sides. The electricity generated by the Rwegura hydropower plant is of significant importance to the national economy, and is a fundamental necessity for the livelihood and development of the country. The Republic of Burundi has a long history of providing electricity to its population and industry. The topography of the Republic of Burundi encompasses a vast range of altitudes, from the level of Lake Tanganyika, whose lowest point is at an elevation of approximately 775 meters, to the highest mountain, Mount Heha, which reaches an elevation of 2,670 meters. Consequently, the topography of the country is characterised by a considerable altitude difference, which is conducive to the utilisation of hydraulic energy. Regular monitoring of the measurement and control system has revealed that the groundwater level in the left wall downstream of the dam has remained relatively stable, whereas in the right part it has fluctuated between its minimum and maximum values.

Keywords: piezometric measurements, pressure, monitoring, hydraulic structures, dam, deformation, water level

Техногенный объект – это объект, созданный человеком в процессе производственно-хозяйственной деятельности. Такие объекты могут быть потенциальным источником катастроф, характеризующихся нанесением ущерба социальной, экономической, экологической и природной среде. Поэтому необходимо учитывать все эти разнообразные факторы, чтобы прогнозировать тенденции деформации объекта или его отдельных элементов и принимать меры по обеспечению его функционирования в соответствии с техническими условиями. В современную эпоху, когда существует постоянный риск возникновения чрезвычайных ситуаций, обеспечение безопасно-

сти техногенных промышленных объектов в связи со значительными негативными социально-экономическими и экологическими последствиями имеет первостепенное значение для государства. Плотины находятся под длительным воздействием сложных природных геологических условий и различных внешних сил, поэтому условия эксплуатации плотин постоянно меняются. Крупное сооружение плотины водохранилища часто требует долгосрочного мониторинга устойчивости, а также постоянного контроля безопасности [1].

В настоящее время необходимо исследовать устойчивость гидроэлектростанции Рвегура в связи с колебаниями климатиче-

ских условий. В Восточной Африке наводнения – обычное явление в сезон дождей, что может привести к повышению уровня воды в водохранилище или уровня грунтовых вод. Увеличение выработки электроэнергии в этот период представляет значительный риск для структурной целостности объекта и всего человеческого сообщества. Речная долина подвержена оползням, особенно в нижнем течении, где у подножия оползня происходит речная эрозия. Кроме того, сезонное насыщение почвы влагой способствует ускорению оползней. Ускорение этих процессов (из-за повышения уровня грунтовых вод, возможно, вследствие сейсмических толчков и трещин в грунте, обеспечивающих быструю инфильтрацию поверхностных вод) неизбежно приведет к усилению движения почвы и образованию оползней в районе плотины, за которой может образоваться большое озеро. Следовательно, анализ деформационных процессов на плотине очень важен по нескольким причинам, например, для мониторинга безопасности, поскольку он помогает следить за целостностью конструкции и безопасностью плотины. Кроме того, анализ деформаций дает представление о поведении плотины при различных нагрузках и условиях окружающей среды и помогает лучше понять, как плотина реагирует на такие факторы, как водная нагрузка, гидравлические градиенты, эрозия и насыщение [2–4].

Методология мониторинга плотины должна быть определена в ходе разработки проекта. В ходе строительства устанавливаются многочисленные приборы для мониторинга деформаций. Однако мониторинг и наблюдение за плотинной должны продолжаться и после завершения строительства. Некоторые устройства необходимо будет демонтировать и заменить новыми [5]. Для контроля параметров во времени используются наблюдения за пьезометрами, притоком фильтрационных вод и датчиками, измеряющими изменения порового давления и давления на почву.

Материалы и методы исследования

Объект исследования. Плотина Рвегура была построена в долине р. Гитенге и Мвочора, расположена между тремя провинциями: Каянза (община Мурута), Бубанза (община Мусигати) и Чибитоке (община Букинаньяна). Место было выбрано благодаря большой площади водосбора, большому количеству осадков и устойчивости к сдвигам грунта, благодаря наличию скальных пород

в этом районе. Размеры плотины следующие: длина 220 м, высота 47 м, ширина 6 м. Расход воды составляет $8 \text{ м}^3/\text{с}$, а общая площадь поверхности – $2,6 \text{ км}^2$. Максимальный уровень водохранилища в период исключительных паводков составляет 2153,50 м, а минимальный уровень водохранилища ниже по течению – 2140,50 м [6].

Процесс выбора периода измерений включает снятие показаний с 27 пьезометрических точек, расположенных по обеим сторонам плотины Рвегура, за 26 лет, с 1992 по 2018 г. Показания снимаются с верхней стороны плотины, которая обращена к водоему, а измерения проводятся с нижней стороны, с которой вода стекает обратно в реку Китенге.

В году есть два сезона дождей и два сухих сезона. Первый короткий сезон дождей длится с сентября по октябрь, а длинный сезон дождей – с февраля по середину мая. На изменение пьезометрических данных во времени влияет режим осадков. Режим осадков уменьшается с середины мая до начала октября, формируя сухой сезон.

Кроме того, распределение осадков по территории страны неравномерно: в южных и северных регионах оно отличается. Годовое количество осадков составляет от 1200 до 1700 мм. В центральном регионе страны среднегодовая температура составляет около 20°C . На самых высоких горных вершинах средняя температура составляет около 16°C . Среднемесячная температура на равнинах колеблется от 16 до 22°C . Климат в районе оз. Танганьика и р. Рузизи классифицируется как теплый экваториальный, в то время как в других регионах страны климат континентальный и мягкий.

Объем внутренних подземных вод остается относительно стабильным и составляет около 7 млрд м^3 в год. В стране наблюдается долгосрочное среднегодовое пополнение подземных вод за счет осадков. Возобновляемые ресурсы подземных вод в стране рассчитываются двумя способами. В засушливых странах оценивается годовая скорость инфильтрации. Во влажных странах рассчитывается донный речной сток.

Геологическое строение правого и левого участков плотины Рвегура заметно отличается. Геологическая карта Бурунди указывает на наличие гранитной породы с разломами по обеим сторонам водохранилища – геологическая особенность, характерная для Бурундийской супергруппы (эквивалент хребта Кибари). Разломы мог-

ли способствовать утечке воды из плотины. Учитывая тектоническую нестабильность региона, также возможно, что трещины и разломы в гранитной породе могли негативно повлиять на срок службы плотины. Гидрогеологическое и геотехническое исследование позволило бы точно определить источник разлива и подтвердить его точное местоположение на правом берегу. На этом берегу породы представлены формацией Нгози (Ng) и формацией Мигого (Mo).

Формация Нгози представляет собой преимущественно перлитовый массив с вкраплениями метавулканических пород (базальт с миндалевидной текстурой) и связанных с ним вулканогенно-осадочных пород в основании. Вблизи гранитного интрузива филлиты более кристаллические или слюдястые. Формация Мигого состоит из перлитовых пород с некоторыми вкраплениями песчаных пород. Сложена она преимущественно сероватыми сланцами, которые обычно хорошо просели и выветрились, образовав серо-красную полосу филлитов и черно-серых, серовато-голубых, беловато-серых, красноватых, иногда зональных пластов с мелкими вкраплениями серых, коричневых, красноватых мелких кварцитов. В этих перлитовых породах часто встречаются андалузит, хлоритоид, биотит, ставрогид.

Во время строительства плотины Рвегура была собрана геологическая информация и пьезометрические данные. Было замечено, что геологическая структура различается по разные стороны плотины, что приводит к различным эффектам давления и потенциальным деформационным процессам. Кроме того, между двумя участками наблюдались различия в пьезометрических данных, а пополнение подземных вод происходило в зависимости от сезона. Учитывая вышеупомянутый контекст, воздействие сезона дождей на тело оползня становится более заметным по мере увеличения просачивающихся вод.

Регулярный мониторинг системы замера и контроля показал, что уровень грунтовых вод в левой стенке ниже по течению от плотины оставался стабильным, в то время как в правой части он увеличивался от явного к резкому [6, 7].

Правый край ослаблен глубокими геологическими изменениями, а также подвержен боковой и подземной инфильтрации. Важно обратить особое внимание на уровень грунтовых вод и количество воды, проникшей в эту часть.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам наблюдений отмечается различие пьезометрических данных для левых и правых участков. Независимо от типа плотины, фундаменты и опоры подвергаются давлению, вызванному потоком воды. Эти давления могут быть определены на месте с помощью пьезометров [8]. Пьезометрические данные имеют решающее значение для изучения деформационных явлений на плотине по нескольким причинам. Они необходимы для понимания гидрогеологических факторов, которые могут способствовать деформации на электростанции и для разработки соответствующих стратегий мониторинга и управления [9, 10].

Результаты показывают, что существуют различия в показаниях пьезометров в разных местах плотины (рис. 1 и 2).

Было также проведено сравнение уровней воды на разных участках плотины Рвегура. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Сравнение уровней воды, наблюдаемых на правой стороне плотины

1-й (в мбар.)	4-й (в мбар.)	7-й (в мбар.)
40	20	50
30	30	30
30	60	60
50	40	50

Таблица 2

Сравнение уровней воды, наблюдаемых на левой стороне плотины

1-й (в мбар.)	4-й (в мбар.)	7-й (в мбар.)
30	30	50
50	40	30
50	30	40
50	50	40

Рис. 1 и 2 показывают, что все измерения пропорциональны на всех участках, расположенных ближе к берегу. Конструктивные особенности плотины не влияют на результаты измерений. Графики зависят исключительно от уровня воды. Однако характеристики реакции плотины на уровень воды, приведенные в табл. 1 и 2 третьей колонки (7-й), вызывают сомнения. С одной стороны (рис. 2), автор наблюдает увеличение, но оно не является значительным.

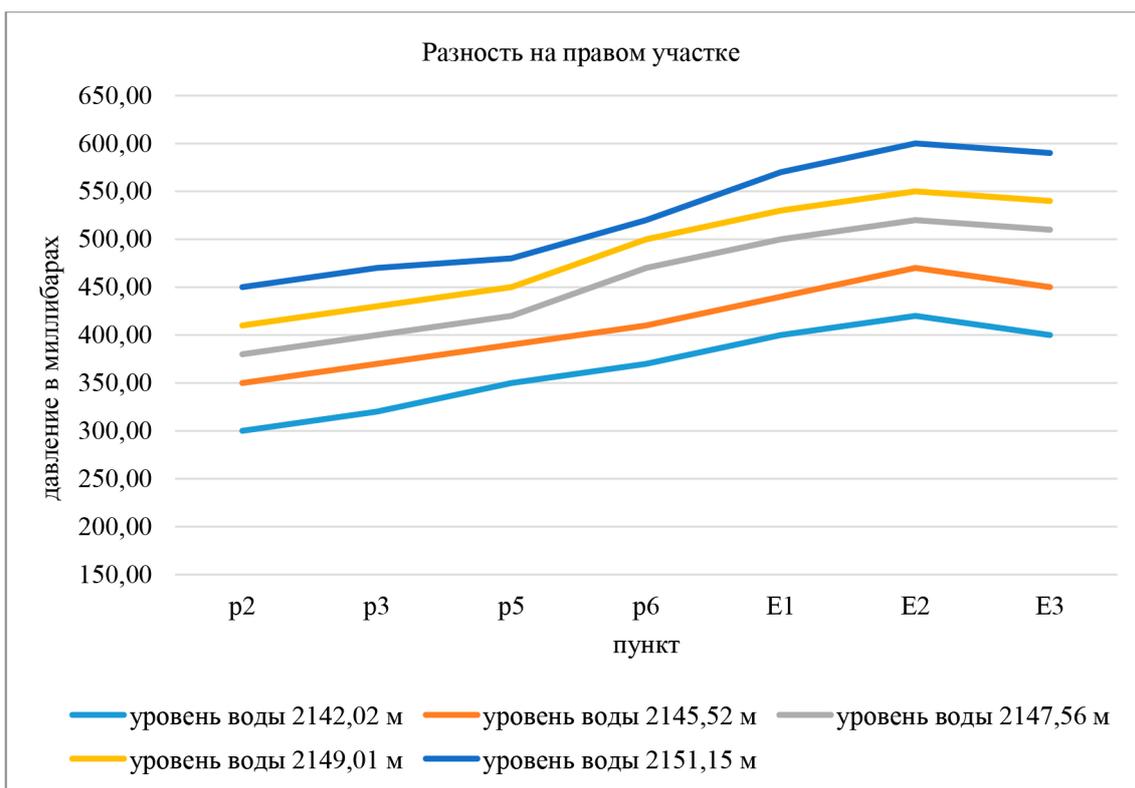


Рис. 1. Сравнение измерения насыти и правого берега к центру для пяти уровней воды

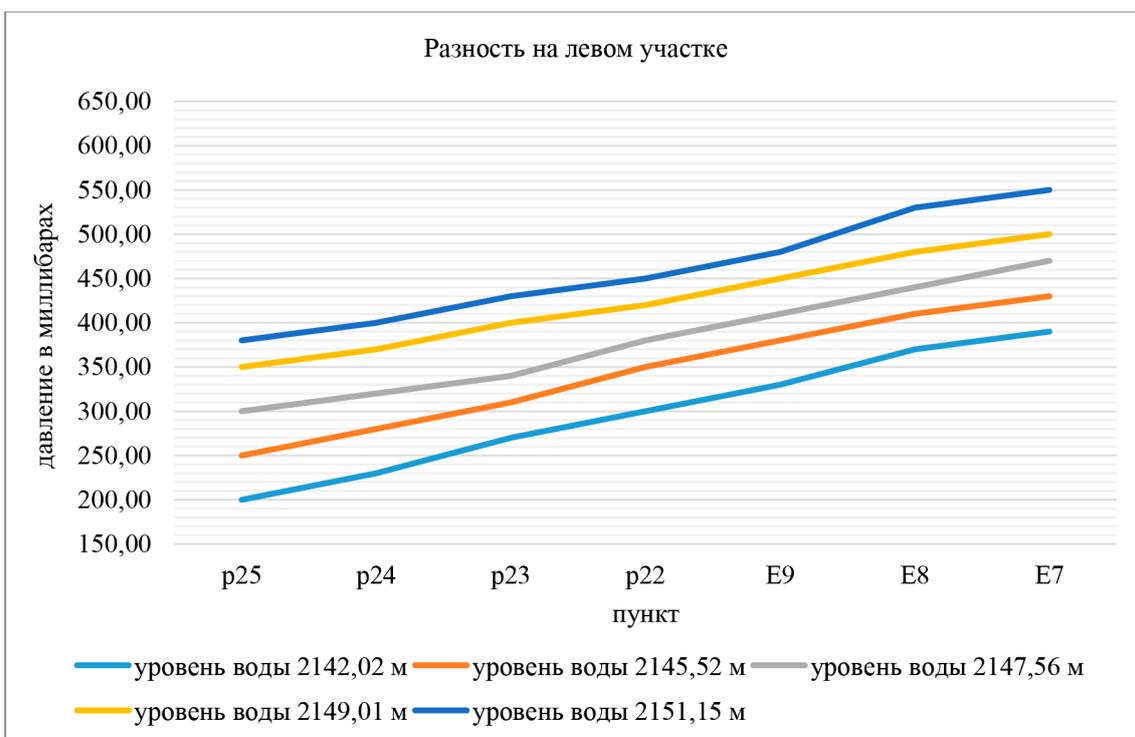


Рис. 2. Сравнение измерения насыти и левого берега от берега к центру для пяти уровней воды

Пьезометрические показатели реагируют на насыпи и изменения в плотинах по-разному. Разница между насыпями и результатами измерений изменяется с разных сторон (справа и слева) в зависимости от уровня воды. Это происходит ежегодно, и если в плотину не вносятся изменения, то разница должна оставаться постоянной. Разница в показаниях объясняется установкой стабильных плотин. Разница между правой и левой сторонами отчетлива, и результаты неодинаковы. Если нет необходимости изменять плотину, то эта разница должна быть постоянной.

При максимальном уровне воды у левого края плотины разница увеличивается на 30–50 мбар в точках E9, E8 и E7 (3 точки), как показано на рис. 2.

На правом краю рис.1 разница более стабильна у берега и увеличивается с 20 до 50 мбар в точках р6, E1, E2 и E3 (4 точки). Можно сделать вывод, что перепад увеличивается больше на правом краю, чем на левом. Таким образом, автор видит, что плотина реагирует по-разному.

Заключение

В статье приводится анализ деформации плотины Рвегура на основе геологических и пьезометрических данных. Геология на правой стороне имеет уникальную характеристику, в то время как изменения на левой стороне однородны. Неясно, вызваны ли они деформациями плотины или являются ошибкой измерений. Существует разница в пьезометрических показаниях на обеих сторонах, причем на левой стороне наблюдается нелинейное увеличение. Разница между насыпью и краем должна увеличиваться линейно, но в центре она гораздо больше. Разница между пьезометрическими показаниями варьируется на пяти уровнях. На больших уровнях разница больше, а в разных точках дамбы она увеличивается с удалением от берега.

На основании анализа пьезометрических данных, полученных на плотине, можно

сделать следующие выводы: во-первых, разница между давлением в насыпи и по краям составляет в среднем 30 мбар, что можно считать приемлемым как для правого, так и для левого берегов плотины; во-вторых, измерения на правом и левом берегах показали асимметричную разницу в 60 мбар, что составляет 5% от нагрузки на плотину.

На основе анализа различных уровней воды было установлено, что существует разница и нелинейная зависимость от уровня воды.

Список литературы

1. Wang P., Xing C., Pan X. Reservoir Dam Surface Deformation Monitoring by Differential GB-InSAR Based on Image Subsets // *Sensors (Basel)*. 2020. № 20 (2). P. 396. DOI: 10.3390/s20020396.
2. Безродный К.П., Лебедев М.О. О нагрузках от горного давления на обделки тоннелей закрытого способа работ // *Записки Горного института*. 2017. Т. 228. С. 649–653. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.649.
3. Аль Фатин Х.Д., Мустафин М.Г., Исмаэль Х.С. Геодезический мониторинг деформаций водоподпорных гидротехнических сооружений с учетом оценки уровня воды водохранилища // *Естественные и технические науки*. 2019. № 4 (130). С. 122–125.
4. Ескин А.Ю., Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В. Геофизические исследования на земляной плотине Иркутской ГЭС с целью изучения ее фильтрационной устойчивости // *Вестник ИрГТУ. Науки о Земле*. 2014. № 11 (94). С. 64–70.
5. СТО 4.2-5-2015. Мелиоративные системы и сооружения. Эксплуатация. Оценка технического состояния гидротехнических сооружений. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. 5 с.
6. Centrale hydroélectrique de Rwegura, rapport de remplissage de la retenue et d'auscultation du barrage. Regideso, Bujumbura, Burundi. Octobre. 1986. P. 31.
7. Мустафин М.Г., Аль Фатин Х.Д., Хатум Х.М. Некоторые особенности мониторинга деформационных процессов на горногидротехнических объектах // *Маркшейдерский вестник*. 2020. № 6 (139). С. 51–60.
8. Деменков П.А., Голдобина Л.А., Трушко О.В. Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» // *Записки Горного института*. 2018. Т. 233. С. 480–486. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.480.
9. DRA-91 2012. Maîtrise des Risques Accidentels sur les ouvrages hydrauliques: Opération B.2. Rapport d'étude. Paris. Dunicliff, J. 1993. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, John Wiley & Sons. P. 29.
10. Zhu Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete. The United States of America, 2014. 500 p.