

СТАТЬЯ

УДК 528.48:627.8

DOI 10.17513/use.38375

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДОХРАНИЛИЩА
ПЛОТИНЫ РВЕГУРА ПО ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ****Биханга Бьенвеню***Государственный университет по землеустройству, Москва, e-mail: bihangab@gmail.com*

Данное исследование направлено на определение значимости пьезометрических данных в мониторинге безопасности и структурной целостности водохранилищ плотин в Республике Бурунди. В ходе исследования был проведен комплексный анализ пьезометрических измерений, собранных в период с 1992 по 2018 годы, с изучением изменений уровня воды и пьезометрического давления в различных точках конструкции плотины. Автор использовал данные из множества точек измерений, уделяя особое внимание сравнению характеристик левого и правого берегов с учетом тропического климата Республики Бурунди. Отмечено различие в пьезометрических показаниях, что указывает на возможность структурных деформаций и неравномерность сил внутри плотины. Эти колебания были сопоставлены с климатической динамикой, с годовым количеством осадков. Полученные результаты проясняют сложную взаимосвязь между условиями окружающей среды и устойчивостью гидроэнергетической инфраструктуры. В исследовании делается вывод о том, что непрерывный пьезометрический мониторинг необходим для выявления потенциальных структурных проблем, вопросов технического обслуживания и изменения эксплуатационных параметров. Исследование подчеркивает важность разработки усовершенствованных моделей прогнозирования для обеспечения долгосрочной структурной целостности и безопасной эксплуатации плотин. Рекомендуется дальнейшее изучение механизмов дифференциальных деформаций в гидроэнергетической инфраструктуре.

Ключевые слова: плотина, климатические условия, деформация, пьезометрические данные, водохранилище, уровень воды, эксплуатация, давление

**ASSESSMENT OF CHANGES IN THE LEVEL OF THE RWEGURA
DAM RESERVOIR BASED ON PIEZOMETRIC DATA****Bihanga Bienvenu***State University of Land Use Planning, Moscow, e-mail: bihangab@gmail.com*

The objective of this study is to ascertain the significance of piezometric data in monitoring the safety and structural integrity of dam reservoirs in the Republic of Burundi. The study employed a comprehensive analysis of piezometric measurements collected between 1992 and 2018, with an examination of water level and piezometric pressure variations across different points of the dam structure. We used data from a multitude of measurement points, with a specific emphasis on comparing the characteristics of the left and right banks, while taking into account the tropical climate of the Republic of Burundi. The analysis yielded significant variations in piezometric readings, which suggest the potential for structural deformations and unequal forces within the dam. These variations were contextualized against the climatic dynamics, mainly annual rainfall patterns. The findings elucidate the complex interrelationship between environmental conditions and the stability of hydropower infrastructure. The research concludes that continuous piezometric monitoring is essential for identifying potential structural problems, maintenance issues, and operational parameter changes. The study underscores the importance of developing improved prediction models to ensure long-term dam structural integrity and safe operation, recommending further investigation into the mechanisms of differential deformation in hydropower infrastructure.

Keywords: dam, climatic conditions, deformation, piezometric data, reservoir, water level, operation, pressure

Введение

При строительстве сложных инженерных сооружений первостепенное значение имеет обеспечение безопасности окружающей среды. Возможность значительного материального ущерба и человеческих жертв в случае разрушения конструкции делает всесторонний мониторинг критически важным. Разрушение конструкций не является внезапным событием, а представляет собой прогрессирующий процесс с идентифицируемыми предвестниками. Это подчеркивает важность непрерывного мониторинга состояния конструкций и своевременного профилактического вмешательства как важ-

нейших стратегий поддержания эксплуатационной безопасности [1].

Гидротехнические сооружения представляют собой сложные инженерные системы, предназначенные для использования водных ресурсов и управления ими в различных целях, включая производство электроэнергии, управление водными ресурсами, орошение сельскохозяйственных угодий, борьбу с наводнениями, судоходство, аквакультуру и отдых. Являясь важнейшей инфраструктурой, прерывающей естественный поток воды, плотины подвержены постоянному воздействию сложных гидродинамических сил. Несмотря

на строгий инженерный дизайн и протоколы строительства, эти сооружения по своей природе обладают потенциальными факторами риска. Следовательно, систематические и передовые методы мониторинга имеют решающее значение для обнаружения ранних признаков отклонения конструкции или потенциальных режимов отказа. Архитектурная конфигурация и структурный состав гидроэнергетических комплексов определяются несколькими взаимозависимыми факторами: выбранной стратегией использования энергии реки (системы водохранилищ или отводов), экономическими целями инфраструктурного проекта и конкретными геоморфологическими и экологическими характеристиками места строительства [1, 2].

Пьезометрические данные имеют большее значение для мониторинга плотин, поскольку дают неоценимое представление о гидравлическом поведении плотинных сооружений. Они включают в себя мониторинг просачивания и внутреннего уровня воды, что необходимо для понимания нагрузки, оказываемой водой на плотину, и обнаружения утечек или потенциальных отказов. Регулярно анализируя пьезометрические данные, инженеры могут принимать обоснованные решения о необходимом техническом обслуживании и мерах по предотвращению катастрофических разрушений [3, 4].

Цель данного исследования – проанализировать пьезометрические данные водохранилищ плотин в Республике Бурунди, плотина Рвегура, изучив изменения уровня воды и пьезометрического давления за период с 1992 по 2018 годы, чтобы выявить потенциальные структурные деформации и предложить меры по улучшению мониторинга и прогнозу моделирования устойчивости гидроэнергетической инфраструктуры.

Материалы и методы исследования

Актуальное состояние гидроэнергетических плотин в государстве Бурунди

Плотина Рвегура является основным сооружением гидроэнергетического проекта, она находится в провинции Чибитоке в Республике Бурунди и была введена в эксплуатацию в 1986 году. Конструкция плотины является результатом сложного взаимодействия важнейших инженерных параметров, включая требования к размерам, функциональные задачи, экологические и геологические характеристики конкретного объекта, а также свойства основ-

ных материалов. В инженерном отношении существует критическое различие между плотинами водохранилищ и водосливами, последние специально предназначены для регулирования уровня поверхности воды в верхнем течении. Классификация плотин представляет собой многомерную оценку гидравлической инфраструктуры, характеризующейся различными функциональными архетипами. Непроницаемые плотины предназначены для всестороннего ограничения водного потока и служат основным гидравлическим барьером. Водосбросные плотины стратегически спроектированы для управления и перенаправления избыточных объемов воды с помощью механизмов поверхностных водосбросов (открытых или механически управляемых) и инженерных систем сброса воды в глубокие каналы. Гидроэлектрические плотины имеют точную конфигурацию со специализированными водозаборными сооружениями и гидравлическими каналами, оптимизированными для питания турбинных систем, что способствует эффективному преобразованию энергии. С точки зрения материаловедения, плотины систематически классифицируются по их первичному структурному составу: геотехнические сооружения на основе грунта/почвы, конфигурации из литической (каменной) кладки и железобетонные инженерные решения. Каждая классификация отражает тонкие инженерные соображения, конструктивные возможности и адаптивные стратегии, разработанные с учетом уникального гидрологического и геологического контекста конкретного объекта. Все типы плотин используются на гидроэлектростанциях [5].

Строительство плотин включает в себя тщательно спланированную последовательность гидротехнических мероприятий, которые динамически управляют гидрологией реки в процессе развития инфраструктуры. Первоначально река поддерживает свой естественный поток через беспрепятственный участок русла. На последующих этапах строительства стратегически используются временный пропуск потока через специально спроектированные отверстия в насыпи, которые после завершения строительства систематически заделываются. В случае с более узкой морфологией реки строительство бетонной плотины может быть синхронизировано с временными изменениями реки для обеспечения непрерывного управления водными ресурсами и минимального воздействия на окружающую среду.

Бетонная плотина представляет собой сложное гидротехническое сооружение, спроектированное с учетом точных конструктивных особенностей. Обычно возводимые на тщательно подготовленном неармированном основании, эти сооружения предназначены для обеспечения контролируемой динамики водного потока при оптимальном градиенте давления. В конфигурацию сооружения часто входят сложные гидравлические элементы, в том числе бетонные волнорезы, соединенные между собой специализированными гидравлическими шлюзовыми механизмами, которые создают сложные русловые структуры.

Проект инфраструктуры часто включает в себя компоненты водохранилища, технически характеризующиеся как водоприемные ямы, иногда разделенные на специализированные подсекции, а также вспомогательные структурные элементы, такие как фартуки. Эти инженерные компоненты взаимодействуют друг с другом, управляя потоком воды, контролируя гидравлическое давление и обеспечивая общую структурную целостность и эксплуатационную эффективность гидротехнической системы. Под коллектором устанавливается дренаж.

Гидроэнергетическая инфраструктура Республики Бурунди сталкивается с особым набором проблем, обусловленных уникальными географическими и климатическими особенностями страны, которые представляют собой целый ряд специфических вопросов. Регион отличается наличием двух основных сезонов. Сезон дождей определяется как период времени, в течение которого выпадает наибольшее количество осадков. Сухой сезон отличается малым количеством воды и потенциальной нестабильностью почвы. Разнообразный рельеф страны, включающий в себя крутые горы и различные типы почв, создает значительные инженерные трудности при строительстве плотин. Некоторые регионы отличаются обилием воды и растительности, в то время как другие представляют собой более сложные топографические условия. Несмотря на признание электричества в качестве ключевого элемента национального развития, Республика Бурунди также не обладает значительным местным опытом в области строительства плотин. Это подчеркивается необходимостью наращивания технического опыта и использования возможностей международного сотрудничества для содействия развитию устойчивой гидроэнергетической инфраструкту-

ры. Следует отметить также что, для того чтобы оценить функциональность плотин в Республике Бурунди, необходимо рассмотреть ряд факторов, включая стабильность почвы, управление водными ресурсами, геологическую оценку строительных площадок и долгосрочные стратегии технического обслуживания.

Несмотря на трудности, есть несколько гидроэлектростанций, которые имеют большое значение для производства электроэнергии и развития энергетического сектора страны. В настоящее время в эксплуатации находятся не менее 20 гидроэлектростанций, еще три находятся в стадии строительства. Все эти объекты в совокупности обеспечивают наиболее стабильное электроснабжение.

Однако из 20 гидроэлектростанций три являются самыми мощными с точки зрения выработки электроэнергии. Самые значительные из них – Рвегура, Рузибази и недавно открытая Кабу 16. Рвегура, в частности, считается основной гидроэлектростанцией и ключевым элементом энергетической инфраструктуры государства Бурунди. В настоящее время установленная мощность производства электроэнергии в стране составляет около 97,2 МВт, из которых на долю гидроэлектростанций приходится почти 49 МВт. Большинство гидроэлектростанций находятся в собственности и под оперативным контролем REGIDESO (Régie de Production et de Distribution de l'Eau et de l'Électricité) – национального коммунального предприятия, отвечающего за производство и распределение электроэнергии. Однако доступ к электроэнергии в государстве Бурунди остается одним из самых низких в мире по сравнению с другими странами [6].

В данной работе изучены данные из 27 пьезометров, которые были установлены в нескольких точках, распределенных по нескольким профилям плотины. При установке пьезометры были спроектированы таким образом, чтобы их фундаменты достигали высоты 2110 м. Некоторые пьезометры успешно достигли данного уровня, другие были установлены на несколько меньшей высоте.

Динамика климата и мониторинг гидроэлектростанций в Бурунди с использованием пьезометрических данных

Географическое положение Бурунди обуславливает сложный тропический климат, характеризующийся значительными про-

странственными колебаниями температуры. На климатические условия страны в первую очередь влияет топографическое разнообразие, которое привело к формированию отдельных микроклиматических зон. Центральный регион характеризуется умеренным климатом со средней температурой около 20°C. Напротив, в районах, прилегающих к озеру Танганьика, климат теплее – средняя температура составляет около 23°C. Контраст между горными территориями и заметно более низкими температурами, которые они обеспечивают, подчеркивает сложный метеорологический ландшафт.

Благодаря своему расположению государство имеет тропический климат, который является относительно жарким и влажным. Температуры значительно варьируются от одного региона к другому, главным образом из-за различий в высоте местности. Выпадения осадков также неравномерны между южной и северной частями страны. Годовое количество осадков составляет от 1200 до 1700 мм в год (рис. 1) [7, 8].

График хорошо отображает сезонный характер осадков в регионе. На нем четко прослеживается сезонность: наибольшее количество осадков выпадает в сезон дождей, а наименьшее – в июне, июле и августе, что соответствует более сухому сезону.

Эти колебания количества осадков оказывают значительное влияние на гидрологические системы страны, которые, в свою

очередь, влияют на потенциал выработки гидроэлектроэнергии.

В последних исследованиях в области изменения климата и его влияния на управление гидроэнергетикой особое внимание уделяется значению метеорологических переменных, в частности температуры и осадков. В научной литературе, посвященной влиянию изменения климата на гидроэнергетическую инфраструктуру, наблюдается значительное разнообразие подходов. Некоторые исследователи ограничиваются моделями осадков, признавая, что осадки являются основным фактором, определяющим доступность воды для производства электроэнергии. Альтернативные методологические схемы предлагают комплексный анализ, изучающий взаимосвязи между изменением климата, трансформацией землепользования и потребностями в ирригации [9].

Гидроэнергетический сектор сталкивается с серьезными проблемами, обусловленными локальной динамикой климата. Потенциал изменения климата вносит значительную степень неопределенности в планирование и эксплуатационную надежность энергетической инфраструктуры [10, 11]. Для поддержания стабильного энергоснабжения и развития устойчивой инфраструктуры необходимо разработать комплексные стратегии адаптации, учитывающие экстремальную изменчивость климата.

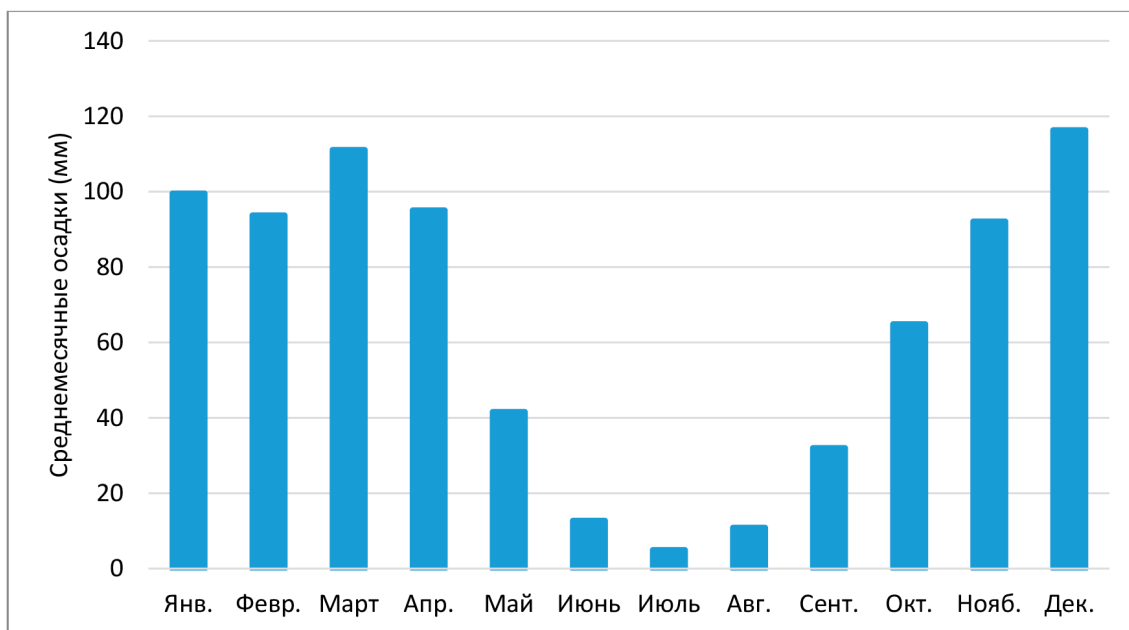


Рис. 1. Среднемесячное количество осадков (1992–2018 гг.)

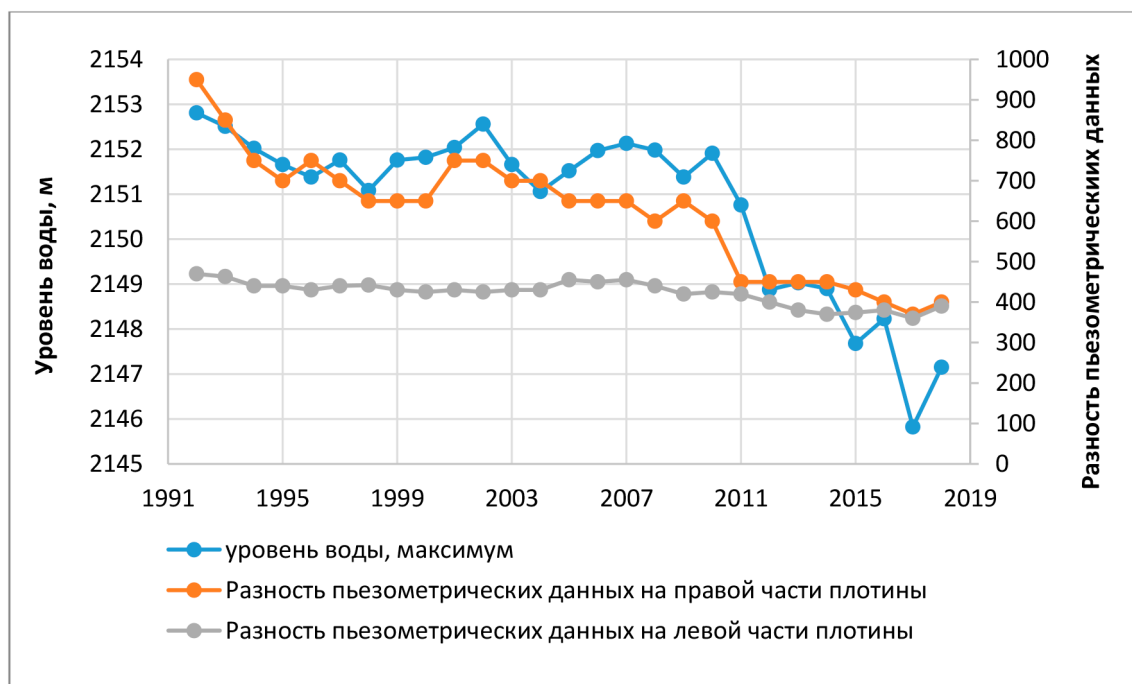


Рис. 2. Взаимосвязь между уровнем воды и пьезометрическими данными, показывающая, как сильно уровень воды влияет на правую и левую стороны

Еще одним подходом является использование взаимозависимости между уровнем воды и пьезометрическими данными в плотинах, так как она очень важна для поддержания их безопасности и эксплуатационной эффективности. Необходимо продолжать исследования, чтобы усовершенствовать методики учета этих сложных взаимосвязей и разработать передовые модели прогнозирования [12]. Показатели пьезометрического давления отражают гидравлическое состояние плотины, где уровень воды влияет на давление пороговой воды в окружающих материалах. Исследования показали устойчивую положительную линейную зависимость между пьезометрическим давлением и уровнем воды, указывающую на то, что с повышением уровня воды повышается и давление пороговой воды. Для оценки взаимосвязи между уровнем воды и пьезометрическим давлением используются различные методы мониторинга [13, 14]. Пьезометры устанавливаются в стратегических местах внутри и вокруг плотины для измерения напора (рис. 2).

Графики демонстрируют колебания уровня воды и пьезометрических показаний за период с 1992 по 2018 годы. Рассмотрена взаимосвязь между уровнем воды и пьезометрическими показаниями, так как наблюдается, что пьезометрические показатели

реагируют на изменения уровня воды. Заметные колебания и отклонения наблюдаются между уровнем воды и пьезометрическими измерениями, особенно в последние годы, что указывает на возможность структурных или эксплуатационных проблем с плотиной.

За 26-летний период уровень воды снижается, и пьезометрические измерения по обеим сторонам плотины также имеют определенную тенденцию к снижению. Однако снижение пьезометрических показателей более выражено на правом берегу, и оно зеркально отражает снижение уровня воды.

Колебания и отклонения, наблюдаемые при пьезометрических измерениях, могут свидетельствовать о наличии структурных проблем, проблем с техническим обслуживанием или об изменении условий эксплуатации плотины с течением времени.

Заключение

Реакции на левой и правой сторонах плотины зависят от пьезометрических данных и, следовательно, должны оставаться стабильными независимо от уровня воды. Если пьезометрические измерения на левой и правой сторонах совпадают, можно предположить, что силовые реакции также будут одинаковыми, что указывает на однородность условий нагружения на обеих

сторонах плотины. Однако данные демонстрируют заметные несоответствия между пьезометрическими показаниями на левой и правой сторонах плотины, это свидетельствует о том, что силы, действующие на плотину, не являются равномерными.

Отсутствие корреляции между уровнем воды и пьезометрическими данными свидетельствует о наличии внешних сил, действующих на плотину и приводящих к деформации.

Геодезические методы могут быть использованы для определения степени и характера деформации, однако они не дают полного представления о причинах, лежащих в ее основе. Расхождение пьезометрических измерений на левой и правой сторонах плотины указывает на наличие деформирующих сил, которые могут привести к возникновению структурных проблем, если их не устранить.

Для выяснения конкретных механизмов, ответственных за дифференциальную деформацию, необходимы дальнейшие исследования и анализ. Совмещение пьезометрических данных на левой и правой сторонах при одинаковом уровне воды станет важным шагом в выявлении основных причин нестабильности. Крайне важно устранить дифференциальные силы, действующие на плотину, чтобы гарантировать ее долгосрочную структурную целостность и безопасную эксплуатацию.

Список литературы

1. СП 40.13330.2012, Свод правил. Плотины бетонные и железобетонные. М., 2012. 3 с.
2. ГОСТ Р 22.2.09-2015 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Экспертная оценка уровня безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений. М.: Стандартинформ, 2016. 6 с.
3. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety: Use of instrumentation in dams // *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 11. Is. 1. P. 145-202. DOI: 10.47260/jesge/1115.
4. Demianiuk A., Stefanyshyn D. The prognostic modelling of piezometric levels based on seepage monitoring in earthen dams // *In MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 322. Is. 01047. P. 1-8. DOI: 10.1051/mateconf/202032201047.
5. Титов Н.Г., Кузякина М.В., Лебедев К.А. Построение теоретической модели прогнозирования уровня воды в реке горного типа с применением цепей Маркова // *Научный журнал КубГАУ*. 2015. № 114(10). С. 1528-1538.
6. W. Wang P., Xing C., Pan X. Reservoir Dam Surface Deformation Monitoring by Differential GB-InSAR Based on Image Subsets // *Sensors (Basel)*. 2020. Vol. 20(2). № 396. DOI: 10.3390/s20020396.
7. Burundi: analyse des facteurs de risques, évaluation des dommages et propositions pour un relèvement et une reconstruction durables. Evaluation rapide conjointe suite à la catastrophe du 9-10 février 2014 aux alentours de Bujumbura. Avril, 2014. URL: <https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/pda-2014-burundi-fr.pdf> (дата обращения: 12.12.2024).
8. Биханга Б. Анализ деформационных процессов на плотине рвегура с помощью пьезометрических измерений в Республике Бурунди // *Успехи современного естествознания*. 2024. № 5. С. 116-120. DOI: 10.17513/use.38275.
9. Mukheibir P. Potential consequences of projected climate change impacts on hydroelectricity generation // *Climatic Change*. 2013. Vol. 121. Is. 1. P. 67–78. DOI: 10.1007/s10584-013-0890-5.
10. Муравьева Е.В., Сибгатуллина Д.Ш., Галимова А.И. Риски функционирования гидротехнических сооружений – хранилищ производственных отходов: проблемы и решения // *Безопасность жизнедеятельности*. 2017. № 5 (197). С. 52-58.
11. Шакирова А.И. Технология снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях с помощью 154 волоконно-оптических систем // *Вестник НЦБЖД*. 2019. № 1 (39). С. 144-152.
12. Kang G., Kim D., Yoon S., Jang B.S., Kim J. Assessing the Stability of Fill Dams by Relationship between Water Level and Porewater Pressure // *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 2020. Vol. 36. Is. 6. P. 5–15. DOI: 10.7843/KGS.2020.36.6.5.
13. Малаханов В.В. Использование температурных пьезометрических наблюдений для мониторинга состояния грунтовых плотин // *Вестник МГСУ*. 2012. № 3. С. 79-89.
14. 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*. 2014. № 11 (94). С. 64-70.