

Методика геодезического мониторинга за насыпными гидротехническими сооружениями

А. А. Шоломицкий^{1*}, Р. Р. Ханнанов¹, М. С. Тутанова¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация,

* e-mail: sholomitskij@mail.ru

Аннотация. Насыпные гидротехнические сооружения, такие как плотины и дамбы хвостохранилищ и золоотвалов, имеют очень широкое распространение и являются опасными производственными объектами. В статье выполнен анализ существующих методов геодезического мониторинга насыпных гидротехнических сооружений, рассмотрены их преимущества и недостатки. Для мониторинга насыпных гидротехнических сооружений предлагается новая методика, в которой основным видом геодезического мониторинга является наземное лазерное сканирование, которое позволяет определить как векторы смещений для отдельных точек, так и площадные деформации, которые можно анализировать с помощью алгебры карт. Для выделения поверхности дамбы используется фильтрация по методу молдинга, который позволяет очистить облако точек лазерных отражений от растительности. Так как ограждающие дамбы имеют большую протяженность, предлагается локализовать места сканирования с помощью геотомографических исследований, которые позволяют выявить участки структурных неоднородностей в теле дамбы, пустот и участки сильно увлажненных пород. Для визуального обследования гидротехнических сооружений предлагается использовать беспилотную авиационную съемку, с помощью которой можно получить трехмерную модель тела дамбы и использовать ее вместе с горнотехнической информацией о составе пород тела дамбы и основания для конечно-элементного моделирования напряжений и фильтрационных процессов в теле дамбы. Кроме того, в статье приводится схема базы данных программного комплекса «Dam deformation», который позволяет хранить комплексную информацию о гидротехническом сооружении и использовать ее для принятия решений о состоянии объекта.

Ключевые слова: дамба, хвостохранилище, сканирование, геодезический мониторинг, деформации, смещение, фильтрация, напряжения, устойчивость, база данных

Введение

Насыпные плотины и дамбы являются одними из важнейших инженерных инфраструктурных объектов, которые играют огромную роль в предотвращении наводнений, производстве электроэнергии и орошении, складировании жидких отходов промышленного производства [1]. Нельзя игнорировать безопасность при эксплуатации плотин, потому что в случае чрезвычайных ситуаций они будут иметь разрушительные последствия для людей, сооружений и окружающей среды. Мониторинг необходим для непрерывного контроля состояния плотин и дамб [2]. Геодезический мониторинг производят на протяжении всего периода эксплуатации гидротехнического сооружения. На этапе проектирования производства геодезического мониторинга разрабатывается общий

план системы наблюдений с перечнем и расположением станций приборов, контрольных и наблюдательных точек. До настоящего времени наиболее распространенным видом геодезического мониторинга насыпных гидротехнических сооружений является геометрическое нивелирование по профильным линиям, которое позволяет определить только вертикальные деформации.

Тахеометр является одним из наиболее распространенных геодезических приборов и играет важную роль в производстве геодезического мониторинга. Он широко используется для геодезических наблюдений за зданиями и инженерными сооружениями. Появление роботизированных тахеометров привело к повышению надежности и автоматизации мониторинга [3–5]. Электронные тахеометры определяют трехмерные координаты

деформационных марок, что позволяет получить трехмерные векторы смещений для отдельных точек.

Методы спутниковой навигации также используются при мониторинге насыпных гидротехнических сооружений, имеют высокую точность и ограниченное применение, так как определяют деформации в дискретных точках объекта.

В последние годы были апробированы и внедрены в практику новые технологии для определения площадных деформаций дамб и плотин. Метод радарной интерферометрии, который с успехом используется для мониторинга бортов карьеров и разрезов при открытой разработке месторождения, для насыпных плотин имеет ограниченное применение из-за «скользящего» луча относительно поверхности. Для этого вида мониторинга растительность тоже является мешающим фактором.

Еще одним методом исследования площадных деформаций является наземное лазерное сканирование, которое успешно применяется для сканирования строительных

конструкций и бетонных гидротехнических сооружений [6–9]. Для земляных плотин растительность является препятствием для исследования объекта. Однако с применением методов фильтрации растительности можно получить поверхность тела дамбы, свободную от растительности. Такие поверхности на разные даты съемки можно сравнивать друг с другом в операциях алгебры карт.

Задача совершенствования методики геодезического мониторинга за насыпными геотехническими сооружениями с комплексным использованием различной информации и обоснованием на основании расчетов является актуальной.

Методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений на базе наземного лазерного сканирования

Методика мониторинга предполагает мониторинг как новых, так и существующих дамб. Структурная схема этапов мониторинга показана на рис. 1.

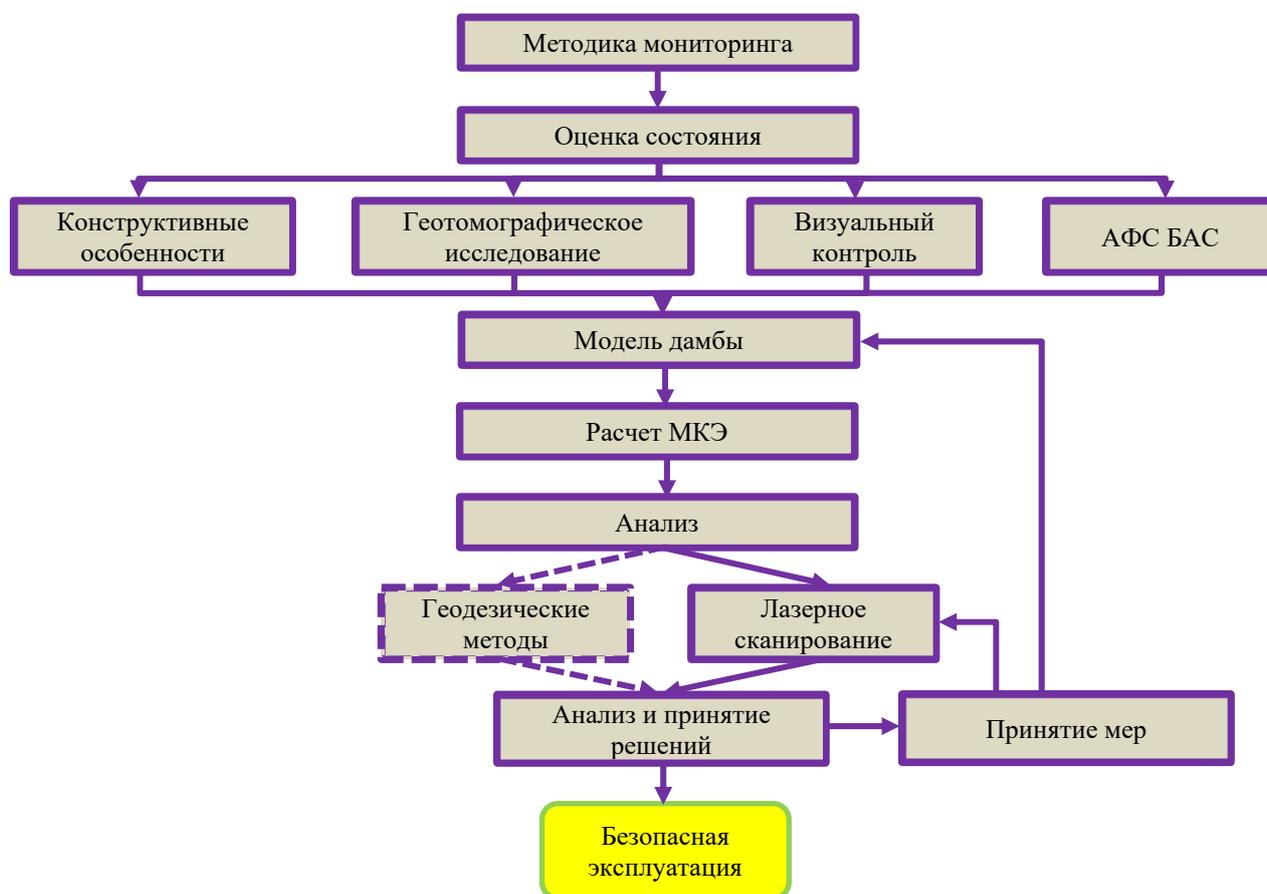


Рис. 1. Схема этапов мониторинга

Если дамба имеет длительный период эксплуатации, мониторинг начинается с оценки ее состояния [10]. Оценка состояния состоит из нескольких элементов:

- исследуется документация о строении дамбы и ее конструктивных особенностях строения, физико-механических свойствах пород, которые слагают тело дамбы;

- выполняются геотомографические исследования для определения внутренней структуры тела дамбы с целью выявления неоднородностей, пустот и переувлажненного материала [11, 12];

- проводятся визуальный контроль и непосредственное обследование [13];

- выполняется аэрофотосъемка БАС с целью фотографического контроля и трехмерного моделирования тела дамбы [14].

На основании этих данных создается трехмерная модель дамбы и вмещающих слоев пород с заданием физико-механических свойств. По этой трехмерной модели выполняется расчет устойчивости методом конечных элементов. Данные расчеты поступают в блок анализа, который анализирует расчет метода конечных элементов и коэффициента запаса устойчивости. В конечно-элементной модели учитываются фильтрационная и гравитационная составляющие от обводненной золы и веса пород тела дамбы. На основании этой информации выбираются методы и средства выполнения мониторинга и его периодичность.

В предлагаемой методике основным методом мониторинга является наземное лазерное сканирование [7]. В некоторых случаях возможно применение геодезических методов измерений – тригонометрического и геометрического нивелирования.

Лазерное сканирование применяется в местах, наиболее подверженных деформациям, которые выбираются по результатам геотомографического обследования. Сканирование участков дамбы выполняется с пунктов наблюдательных станций. Обработка сканов производится по алгоритму молдинга с фильтрацией растительности и выделением поверхности дамбы.

После выполнения очередной эпохи сканирования анализируются полученные по-

верхности и оценивается разность этих поверхностей. Если отклонения поверхностей в допуске – продолжается безопасная эксплуатация объекта и сканирование выполняется один раз в год, а именно проводится обследование в период таяния снегов, повышенной обводненности грунта основания и тела дамбы (весной). Если отклонения больше допуска, то необходимо принятие мер. В качестве мер можно применить сокращение периода наблюдений от одного раза в неделю до одного раза в квартал, все зависит от динамики роста или снижения отклонений. Если отклонения являются критическими и требуют горнотехнических мер (пригрузка оползневых участков или изменение профиля плотины), то после выполнения этих мер требуются корректировка конечно-элементной модели и новый расчет коэффициента запаса устойчивости методом конечных элементов.

Далее следует выполнение пунктов методики, т. е. анализ расчета метода конечных элементов и получение нового коэффициента запаса устойчивости. На основании этой информации выбираются методы и средства выполнения мониторинга и его периодичность. Следующим этапом является наземное лазерное сканирование и анализ поверхности, который должен показать, что возможна безопасная эксплуатация дамбы.

Для автоматизации этих процессов была составлена программа «Dam Deformation» [15], которая позволяет хранить информацию о дамбе и ее измерениях в базе данных (рис. 2).

Программный комплекс «Dam deformation» является справочно-информационной системой для организации данных геотехнического мониторинга за деформациями насыпных дамб золоотвалов. Целями программного комплекса «Dam deformation» является организация базы данных для хранения комплексной информации о всех видах обследования и мониторинга дамбы и удобства выборки нужных данных для использования при составлении заключения об устойчивости сооружения. Второй важной задачей является подготовка информации для составления конечно-элементной модели и экспорт этой модели для расчетов.

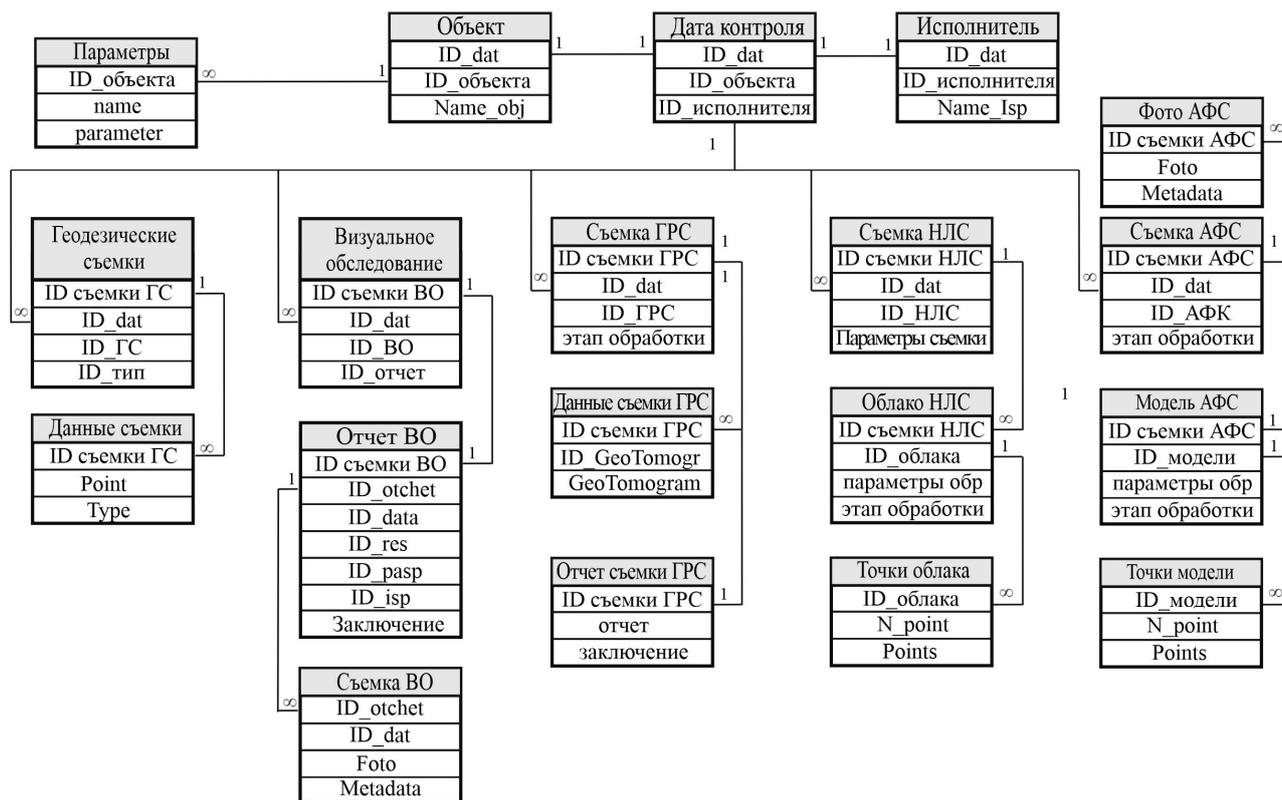


Рис. 2. Структура базы данных ПК «Dam deformation»

На рис. 2 приведена упрощенная схема базы данных программного комплекса «Dam deformation». На схеме показаны только главные таблицы базы данных, без классификаторов и связей «многие-ко-многим». Реализация БД осуществляется с помощью реляционной СУБД SQLite.

Главной таблицей БД является таблица «Дата контроля», которая связывает дату, объект и исполнителя. Таблица «Объект» хранит информацию об объекте, его конструктивных особенностях, проектную документацию и другие параметры объекта, необходимые для организации мониторинга и расчетов. Соглашения о типах данных полей БД, следующие – идентификаторы ID и N_ – это целочисленные поля, все остальные поля строки (длиной до 2Гб) или большие двоичные объекты (BLOB).

Таблица «Дата контроля» связана с таблицами съемок или обследований. Хотя в программном комплексе «Dam deformation» основным видом съемки является наземное лазерное сканирование, предусмотрена возможность хранения традиционных геодезических

наблюдений по профильным линиям с помощью геометрического и / или тригонометрического нивелирования. Для этого служит таблица «Геодезические съемки», связанная с таблицей «Данные съемки» отношением «один-ко-многим». В таблице «Данные съемки» хранятся координаты точек по профильным линиям на разные даты, которые можно представить в виде графиков.

Таблица «Визуальное обследование» содержит материалы визуального обследования дамбы золоотвала. Эти обследования с фотофиксацией должны выполнять ответственные работники эксплуатирующей организации. Эти материалы хранятся в БД на дату обследования и являются подтверждением выполненного обследования. Визуальное обследование может выполняться по материалам аэросъемки, для этого используется таблица «Фото АФС».

По материалам визуального обследования составляется заключение о возможности безопасной эксплуатации или совершении некоторых действий, например внепланового лазерного сканирования или необходимости расчистки дренажной канавы и т. д.

Для дамб, которые только вводятся в эксплуатацию, и дамб, которые имеют длительный срок эксплуатации, бывает необходимо выполнить георадарную съемку, чтобы убедиться в однородности строения дамбы и отсутствии структурных аномалий. Такие данные хранятся в таблицах «Съемка ГРС» и самом структурном строении дамбы, которое записывается в таблицу «Отчет съемки ГРС».

Таблица «Съемка НЛС» является основной для хранения информации наземного лазерного сканирования. Эта таблица связана с таблицей «Облако НЛС», которая предназначена для хранения исходных данных облаков НЛС и этапов их обработки, которых может быть несколько для различных вариантов фильтрации. Собственно, точки облаков хранятся в таблице «Точки облака», эти точки являются поверхностью дамбы, очищенной от растительности, и их можно сравнивать между собой на разные даты. Так, можно выявить участки, которые подверглись деформации за этот период.

Еще одним источником информации о состоянии дамбы является аэрофотосъемка БАС. По точности определения координат поверхности аэрофотосъемка беспилотными авиационными системами пока уступает лазерному сканированию, но по объему информации и возможности автоматизированной обработки эти технологии существенно сблизились. Модель, полученная по материалам аэросъемки БАС, используется для визуального обследования по фотографиям дамбы, но основное ее назначение – это трехмерное моделирование тела дамбы, которое, в совокупности с данными о строении и материале дамбы из таблицы «Параметры», используется для конечно-элементного моделирования и расчетов коэффициента запаса устойчивости. А уже по текущему значению коэффициента запаса устойчивости принимаются решения о частоте наблюдений при выполнении мониторинга или изменении геотехнических параметров дамбы.

Выводы

Применение методики наземного лазерного сканирования необходимо для того, чтобы произвести геодезический мониторинг

за состоянием устойчивости дамбы, который позволит определить участки, подверженные деформациям. Предложенная методика геодезического мониторинга по данным наземного лазерного сканирования отличается от традиционных не только методом выполнения измерений, но и обработкой полученных результатов. Предполагается что наблюдения будут выполняться не за всей дамбой, а только за участками с аномальной структурой, выявленными в процессе геотомографических исследований. Для визуального мониторинга за объектом исследования, а также для построения детальной трехмерной модели тела дамбы применяется аэрофотосъемка БАС. Полученная модель позволяет перейти к конечно-элементной модели и произвести расчет коэффициента запаса устойчивости с учетом порового давления и фильтрации в теле дамбы.

На данный момент в программе «Dam deformation» имеются инструменты для экспорта трехмерной модели в программы конечно-элементного анализа и расчетов. Авторы использовали для этого программный комплекс Midas GTS NX, который был предоставлен СГУГиТ для учебного процесса и научных исследований [16]. Этот комплекс имеет множество методов расчета.

Еще одним достоинством является то, что при расчете устойчивости необходимо ввести и учитывать множество параметров физико-механических свойств грунта. Это позволяет точнее рассчитать коэффициент запаса устойчивости сооружения и определить фильтрационные потоки.

Структура базы данных программы «Dam deformation» позволяет эффективно хранить первичные данные облаков точек лазерных отражений, оперировать ими и хранить производные от этих данных для разных параметров фильтрации. А это, в свою очередь, позволяет хранить комплексную информацию о всех видах обследования и мониторинга дамбы и выполнять выборки нужных данных для использования при составлении заключения о устойчивости сооружения.

В результате моделирования и исследования процессов фильтрации установлено, что наибольший вклад в снижение коэффици-

циента запаса устойчивости дамбы вносят именно фильтрационные процессы, – поэтому геодезический мониторинг целесообразно проводить в периоды максимального водопритока – весной после таяния снега и накопившегося в зимнее время льда и периодически после сильных и продолжительных дождей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kalkan Y. Geodetic deformation monitoring of Ataturk Dam in Turkey // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2014. – Vol. 7. – P. 397–405.
2. Разработка и создание комплекса мероприятий по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений [Электронный ресурс] : методическое пособие. – 341 с. – Режим доступа: https://unesco.org/fileadmin/DAM/env/water/damsafety/textbook_annexes.pdf (Дата обращения: 06.07.2023).
3. Scherer M., Luis Lerma J. From the Conventional Total Station to the Prospective Image Assisted Photogrammetric Scanning Total Station: Comprehensive Review // *Journal of Surveying Engineering*. – 2009. – Vol. 135. – P. 173–178.
4. Wagner A. A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+D images. *Measurement*. – 2016. – Vol. 82. – P. 64–74.
5. Ehrhart M., Lienhart W. Accurate Measurements with Image-Assisted Total Stations and Their Prerequisites // *Journal of Surveying Engineering*. – 2017. – Vol. 143. – P. 04016024.
6. Шоломицкий А. А., Лагутина Е. К., Соболева Е. Л. Использование лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений // *Вестник СГУГиТ*. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 43–57.
7. Ханнанов Р. Р., Михнев А. В. Геодезический мониторинг состояния ограждающей дамбы № 1 золоотвала ТОО «ГРЭС Топар» по методике наземного лазерного сканирования // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сборник материалов в 8 т. (Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. Т. 1. – 13–18. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-13-18.
8. 3D исполнительная съемка методом лазерного сканирования и построение точной трехмерной модели сооружений и территории Майнского гидроузла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ngce.ru/pg_projects139.html.
9. Лазерное сканирование на гидротехнических сооружениях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://асropol-geo.ru/o-proektax/115-lazernoe-skanirovanie-na-gidrotexnicheskix-sooruzheniyax>.
10. Бесимбаева О. Г., Низаметдинов Н. Ф. Создание системы геомониторинга для условий золоотвала ГРЭС // *Труды Университета*. – КарГТУ, 2007. – № 4. – С. 12–15.
11. Низаметдинов Ф. К., Мозер Д. В., Омарова А. К. Перспективы использования наземной радарной интерферометрии в Республике Казахстан // *Мат. VII Междунар. науч.-прак. конф.: «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых»*. – М., 2012. – 102 с.
12. Руководство пользователя RadExPro 2016.1 [Электронный ресурс]. – М. : Деко-Геофизика, 2016. – Режим доступа: https://studylib.ru/doc/6234582/radexpro2016.1-rukovodstvo-pol_zovatelya.
13. Рекомендации по проведению визуальных наблюдений и обследований на грунтовых плотинах П 72 – 2000. – СПб. : ВНИИГ, 2000 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/070/4293812137.pdf>.
14. Беспилотники обеспечивают мониторинг дамб [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://iot.ru/monitoring/bespilotniki_obespechivaut_monitoring_damb.
15. Шоломицкий А. А., Ханнанов Р. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680204 Российская Федерация. Dam deformations: № 2021669927 : дата поступления 08.12.2021 : дата регистрации 08.12.2021; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (RU).
16. Специализированные расчетные комплексы MIDAS: midas GTS NX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://midasoft.ru/products/midas-gts-nx/#capabilities> (дата обращения 08.07.2023).

Об авторах

Андрей Аркадьевич Шоломицкий – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Рустем Рашитович Ханнанов – аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Мируэрт Серикпаевна Тутанова – аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Получено 20.09.2023

© А. А. Шоломицкий, Р. Р. Ханнанов, М. С. Тутанова, 2023

Method of geodetic monitoring for bulk hydrotechnical structures

A. A. Sholomitskiy^{1*}, R. R. Khannanov¹, M. S. Tutanova¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: sholomitskij@mail.ru

Abstract. Bulk hydraulic structures, such as dams and dams of tailings and ash dumps are very widespread and are hazardous production facilities. The article analyzes the existing methods of geodetic monitoring of bulk hydraulic structures, their advantages and disadvantages are considered. For monitoring bulk hydraulic structures, a new technique is proposed, in which the main type of geodetic monitoring is ground laser scanning, which allows the determination of both displacement vectors for individual points and areal deformations that can be analyzed using map algebra. To highlight the surface of the dam, filtering is used according to the molding method, which allows us to clear the cloud of points of laser reflections from vegetation. Since the enclosing dams are long, it is proposed to localize the scanning sites using geotomographic studies, which make it possible to identify areas of structural heterogeneities in the body of the dam, voids and areas of highly moistened rocks. For visual inspection of hydraulic structures, it is proposed to use unmanned aerial photography, with which you can get a three-dimensional model of the body of the dam. The dam body model can be used for finite element modeling of stresses and filtration processes in the dam body. The article provides a database diagram of the "Dam deformation" software package, which allows you to store complex information about a hydraulic structure and use it to make decisions about the state of the object.

Keywords: dam, tailing, scanning, geodetic monitoring, deformations, filtration, stresses, stability, database

REFERENCES

1. Kalkan, Y. (2014). Geodetic deformation monitoring of Ataturk Dam in Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 397–405.
2. Development and creation of a set of measures to ensure the safety of hydraulic structures. Toolkit (341 p.). Retrieved from https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/damsafety/textbook_annexes.pdf [in Russian].
3. Scherer, M., & Luis Lerma, J. (2009). From the Conventional Total Station to the Prospective Image Assisted Photogrammetric Scanning Total Station: Comprehensive Review. *Journal of Surveying Engineering*, 135, 173–178.
4. Wagner, A. (2016). A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+D images. *Measurement*, 82, 64–74.
5. Ehrhart, M., & Lienhart, W. (2017). Accurate Measurements with Image-Assisted Total Stations and Their Prerequisites. *Journal of Surveying Engineering*, 143, P. 04016024.
6. Sholomitskii, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2018). Using laser scanning to monitor long-span structures. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 43–57 [in Russian].
7. Khannanov, R. R., & Mikhnev, A. V. (2022). Geodetic monitoring of the condition of the enclosing dam No. 1 of the ash dump of GRES Topar LLP using the terrestrial laser scanning technique. In *Sbornik materialov Interkespo GEO-Sibir'-2022: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2022: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 13–18). Novosibirsk: SSUGT Publ. DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-13-18 [in Russian].

8. 3D as-built survey using laser scanning and construction of an accurate three-dimensional model of the structures and territory of the Main hydroelectric complex. (n. d.). Retrieved from https://www.ngce.ru/pg_projects139.html [in Russian].
9. Laser scanning on hydraulic structures. (n. d.). Retrieved from <https://acropol-geo.ru/o-proektax/115-lazernoe-skanirovanie-na-gidrotexnicheskix-sooruzheniyax> [in Russian].
10. Besimbaeva, O. G., & Nizametdinov, N. F. (2007). Creation of a geomonitoring system for the conditions of the ash dump of a state district power plant. *Trudy Universiteta [University Proceedings]*, 4, 12–15 [in Russian].
11. Nizametdinov, F. K., Mozer, D. V., & Omarova, A. K. (2012). Prospects for the use of ground-based radar interferometry in the Republic of Kazakhstan. In *Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Nauka i noveyshie tekhnologii pri poiskakh, razvedke i razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference: Science and the Latest Technologies in the Search, Exploration and Development of Mineral Deposits]* (102 p.). Moscow [in Russian].
12. User's Guide RadExPro 2016.1. (2016). Moscow: Deco-Geophysics Publ. Retrieved from https://studylib.ru/doc/6234582/radexpro2016.1-rukovodstvo-pol._zovatelya [in Russian].
13. Recommendations for conducting visual observations and surveys on earth dams P 72 – 2000. (2000). Saint Petersburg: Vedeneev VNIIG Publ. [Electronic resource]. – Access mode: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/070/4293812137.pdf> [in Russian].
14. Drones provide dam monitoring. (n. d.). Retrieved from https://iot.ru/monitoring/bespilotniki_obespechivaut_monitoring_damb/ [in Russian].
15. Sholomitsky, A. A., & Khannanov, R. R. (2021). Certificate of state registration of a computer program No. 2021680204 Russian Federation. Dam deformations: No. 2021669927 [in Russian].
16. Specialized calculation systems MIDAS: midas GTS NX (n. d.). Retrieved from <https://midasoft.ru/products/midas-gts-nx/#capabilities>.

About authors

Andrey A. Sholomitskii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Rustem R. Khannanov – Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Surveying.

Miruert S. Tutanova – Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Surveying.

Received 20.09.2023

© A. A. Sholomitskii, R. R. Khannanov, M. S. Tutanova, 2023