

УДК 528.7

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СОВРЕМЕННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ЗЕМЛЯННЫХ ДАМБ НЕКОТОРЫХ
ВОДОХРАНИЛИЩ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

Л. В. МАНУКЯН^{1,2*}, Ж. С. МАРГАРЯН^{1,2**}, В. А. ГАРИБЯН^{1***},
А. А. МАРГАРЯН^{1****}, С. В. ТОВМАСЯН^{1,2*****}

¹ *Национальный университет архитектуры и строительства, Армения*

² *Комитет кадастра недвижимости Республики Армения*

Представлены результаты исследования и анализа данных, полученных геодезическими наблюдениями на территории Спандарянского, Шамбского и Толорского водохранилищ, расположенных на р. Воротан, и Татевского резервуара суточного регулирования. С использованием геодезических технологий можно выполнить полную картографию водных систем и создать базы данных. Необходимость быстрого реагирования при осуществлении управления невозможна без информационных баз и соответствующих инструментов. Мировой опыт показывает, что эти технологии являются обязательным условием в процессе управления водными системами. Высокотехнологичные работы позволяют повысить точность измерений, сэкономить время производства работ и оптимизировать финансовые затраты.

<https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2023.57.1-2.010>

Keywords: dam, GNSS technologies, geodetic monitoring, cartography, drone, mining.

Введение. В настоящее время деятельность человека в различных сферах существенно влияет на окружающую среду, что уже привело к возникновению сложных проблем: экологических, экономических, социальных. В некоторых случаях техногенное воздействие становится настолько сильным, что оно сравнимо со стихийным бедствием, например с разрушением плотины водохранилища.

Осуществление геодезического мониторинга для ответственных компаний, особенно в плане проведения систематических геодезических наблюдений за водохранилищами, охватывающими большие площади, началось в 1970-х годах рабочей группой ЮНЕСКО по сейсмическим явлениям, связанным с

* E-mail: larisamanukyan@mail.ru

** E-mail: margaryanjora55@gmail.com

*** E-mail: v.gharibyanm5@gmail.com

**** E-mail: anush.margaryan.89@mail.ru

***** E-mail: suren.tovmasyan@gmail.com

крупными водохранилищами. Например, в бывшем Советском Союзе основные геодезические наблюдения в районах гидроэлектростанций проводились на специально созданных геодинимических полигонах с использованием методов триангуляции и полигонометрии.

При исследовании водохранилищ особенно важной предпосылкой для оценки изменений сейсмической активности является учет изменений, наблюдаемых при подъеме уровня воды в водохранилище, а также регистрации четкой взаимосвязи между ними [1]. До сих пор мониторинг движений и выявление величин изменений, вызванных осадками и деформациями плотин, особенно на искусственных водохранилищах, осуществлялись традиционными геодезическими методами. Использование современных спутниковых технологий повысило прогнозируемость появления изменений, значительно снизило затраты человеческих и материальных ресурсов, сократило время исследований [2, 3].

Основной целью концепции строительства водохранилищ и управления ресурсами в Республике Армения (РА) является увеличение водных ресурсов и регулирование речного стока. В РА после 90-х гг. из-за острой нехватки средств на эксплуатацию и ремонт ухудшилось техническое состояние сооружений, обеспечивающих безопасную эксплуатацию водохранилищ, что в итоге может привести к авариям и обрушениям плотин. Некоторые водохранилища также имели конструктивные проблемы, связанные с малой пропускной способностью ливневых стоков и оросительных каналов. Работы, направленные на повышение безопасности плотин, должны включать обеспечение устойчивости плотин, установку средств контроля и безопасности, улучшение условий эксплуатации и т.д. [1].

Материалы и методы. Нами были изучены данные исследований на территориях Спандарянского, Шамбского и Толорского водохранилищ Сюникского марза РА, приуроченных к трем гидроэлектростанциям на р. Воротан, и Татевского резервуара суточного регулирования.

Основными сооружениями вышеуказанных водоемов являются искусственные плотины гидроэлектростанций, которые были построены для комплексного использования водных ресурсов. Эти плотины создают водохранилища в бассейне над ними и используются для водозабора и оросительной системы [4].

Как известно, в зависимости от выполняемой в составе гидроузла роли плотина может быть:

- *глухой*, если служит лишь преградой для потока воды;
- *водосливной*, когда имеет возможность для сброса избыточных расходов воды и оборудована поверхностными водосливными отверстиями (открытыми или с затворами) или глубинными водоспусками;
- *станционной*, если имеет водозаборные отверстия (с соответствующим оборудованием) и водоводы, питающие турбины ГЭС.

По основному материалу, из которого возводят плотины, различают земляные, каменные, бетонные и деревянные плотины. Земляная плотина возводится полностью или частично из малопроницаемого грунта [5–7].

Результаты и обсуждение. Геодезический мониторинг на водохранилищах включает в себя следующие виды работ:

- сгущение планово-высотного геодезического обоснования на всей поверхности водохранилища и вблизи его контура;

- топографическая съемка масштаба 1:10 000 или аэрофотосъемка в районе бассейна водохранилища в равнинной и населенной местности с сечением рельефа через 2 м, в гористой местности – через 10 м;
- крупномасштабная (1:1000 и 1:2000) топографическая съемка рельефа с сечением 0,5 и 1,0 м для планируемых сооружений (пирсы, паромная переправа, подпорные стенки, насосные станции, подпорные ограждения и т.д.);
- перенос контура водохранилища;
- определение поверхности и зеркала водного покрова;
- геодезическое обеспечение гидрологических, геофизических, геологических и других изысканий.

В качестве исходного плано-высотного обоснования для съемки и переноса в натуру контура водохранилища на местности используются пункты государственной и национальной геодезических сетей, сети сгущения и реперы нивелировки I–IV классов. В настоящее время в качестве основного способа сгущения применяются спутниковые наблюдения GNSS.

Контур водохранилища является границей охвата воды по отметке нормального уровня воды. Перенос проектной границы водохранилища на местность осуществляется для определения площади земель, подлежащих покрытию водой. Цель данной работы – перенос в натуру точек, соответствующих высоте проектных отметок водохранилища на местности. Горизонт проектирования часто определяется процессом технического нивелирования. Нивелировка проводится от ближайшего репера водохранилища (например, 1410 на рис. 1) до горизонтальной зоны водного покрытия водохранилища.

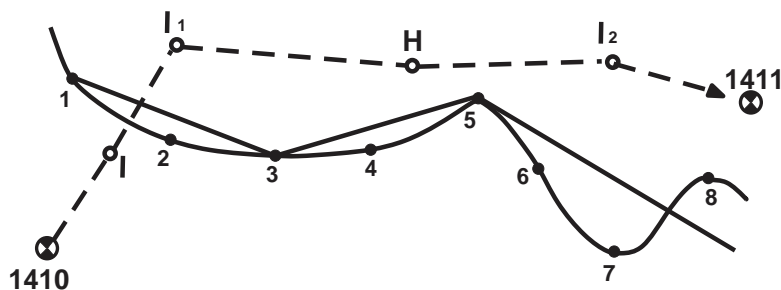


Рис. 1. Схема разбивки проектного контура водохранилища.

Положение точки I определяют по направлению линии нивелирования, отметка которой близка (в пределах 1 м) к отметке расчетной горизонтали. После фиксации положения точки I уровень переходит на следующую станцию – I₁. На этой станции определяют горизонт инструмента (H_{ги}) при установке рейки на точку I и отсчете n (n – отсчет рейки, $n = H_{ги} - H_{проект.}$) [4]. На станции I₂ приборный горизонт повторно определяется путем нахождения n . Точно так же выполняется разбивка точек 5–8. Так определяется горизонтальное взаимоположение между опорными и проектными реперами на местности.

Тригонометрическую нивелировку применяют в случае больших уклонов местности при прокладке высотных тахеометрических ходов с помощью теодолита [8].

В настоящее время электронный тахеометр широко используется для разбивки и закрепления контура водохранилища в полевых условиях. Тахеометр располагают на точке с известной отметкой (точка сети, репера и т.п.), вращая визирную трубу, на вертикальной окружности ставят отметку, равную 90° . Затем вычисляют абсолютную высоту горизонтальной оси вращения инструмента: $H_{и} = H_{реп} + n$. Зная отметку нормального подъема водохранилища и высоту отражателя (v), вычисляют превышение отмеченных точек трассы: $h = H_{реп} + v$. После этого, перемещая отражатель по склону, достигают расчетного превышения и отмечают точку под рейкой отражателя [9].

При наличии крупномасштабной топографической карты или ортофотоплана района водохранилища зону покрытия водой можно определить с высокой точностью. Точность разбивки проектной трассы зависит от рельефа местности и предназначения трассы.

Одним из важных элементов водохозяйственных расчетов является определение поверхности и объема водохранилища. Объем (V) определяется приближенным и уточненным методами [10].

Приблизительно объем водохранилища определяется по объему призмы (объему воды) между смежными горизонталями на топографическом плане:

$$dV = \left[\frac{(F_1 + F_2)}{2} \right] h_c,$$

где h_c – сечение горизонталей, F_1 и F_2 – поверхности покрытия водой.

Для более точного расчета объема используется формула, учитывающая сложность ватерлинии водохранилища на разных уровнях:

$$dV = \frac{F_1 + F_2 + \sqrt{F_1 F_2}}{3} h_c.$$

Здесь поверхности водного покрытия F_1 и F_2 (ограниченные двумя смежными горизонталями) можно измерить планиметром.

Общий объем резервуара находится путем последовательного сложения объемов dV по формуле: $V = \sum dV$.

Время и частота измерений. Наблюдения за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований регулярно проводятся отдельными циклами и в определенный период времени. Всего предусматривается пров5 этапов измерений (циклов), которые могут длиться от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от объема работ и количества исполнителей. Кроме того, инженеров-гидротехников интересует положение сооружения в течение определенного периода времени. Примерная частота наблюдений приведена в табл. 1 [1, 9].

На рис. 2 показана стационарная базовая станция спутникового приемника GNSS, на базе которой осуществляется геодезический мониторинг.

В табл. 1 приведена частота наблюдений за деформациями гидротехнических сооружений по нормам РАМН 13.01.2022 “Геодезические работы в строительстве” строительные нормы РА от 29 июля 2022 г. по приказу председателя Комитета по градостроительству РА № 17-N [11].



Рис. 2. Стационарная базовая станция спутникового приемника GNSS.

Таблица 1

Частота наблюдений за деформациями гидротехнических сооружений

Вид деформации	Цикличность					
	во время строительства			1–3 года после строительства	эксплуатация	
	возведение фундамента	через каждые 5 этажей	окончание строительства	1–2 раза в квартал	2 раза в год	постоянно
Абсолютная осадка	+	+	+	+	+	–
Неравномерная осадка	+	+	+	+	+	–
Крен фундаментов	+	+	+	+	+	+
Прогиб фундаментов	+	+	+	+	+	–
Отклонение от вертикали (крен):						
колонн	–	+	+	–	–	–
лифтовых шахт	–	+	+	–	–	–
монолитной части	–	+	+	–	–	–
Сжатие или усадка колонн	–	+	+	–	–	–
Крен верхней части строительных конструкций	–	–	+	+	+	+

В табл. 2 приведены абсолютные осадки гидротехнических сооружений и среднеквадратические ошибки определения горизонтальных смещений в соответствии с требованиями СНиП III-2-75. Точность определения относительных деформаций должна быть в несколько раз выше. Для бетонных

конструкций и их фундаментов погрешности составляют 0,2–0,3 мм, а для земляных насыпей – 0,5–1,5 мм [1, 12].

Таблица 2

Абсолютные осадки гидротехнических сооружений и среднеквадратические ошибки определения горизонтальных смещений

Объекты наблюдения	Среднеквадратическая погрешность определения деформации, мм	
	осадки	горизонтальные смещения
Бетонные конструкции на скальных основаниях	1	1
Бетонные конструкции на сжимаемых грунтах	2	2
Наземные сооружения: срок строительства	10	5–10
период эксплуатации	5	3–5
Поднятие дна строительного котлована: скальные основания	1–2	–
сжимаемые грунты	5	–
Оползни	30–50	10
Места обрушения скальных массивов	1–2	1–2

Таблица 3

Среднеквадратическая погрешность при определении горизонтальных смещений гидротехнических сооружений

Объекты наблюдения	Среднеквадратическая погрешность определения деформации, мм
Бетонные конструкции на скальных основаниях	1
Бетонные конструкции на сжимаемых грунтах	2
Конструкции на каменистой почве	5
Сооружения на слабосжимаемых грунтах	10
Наземные сооружения	15

При использовании традиционных (неспутниковых) технологий измерительные работы проводились до заполнения водохранилища, затем один-два цикла геодезических измерений, а после заполнения водохранилища – один цикл в год [10].

После заполнения водохранилища с применением современных спутниковых технологий (все три водохранилища в Сюникской области РА введены в эксплуатацию и заполнены) необходимо было выполнить не менее пяти циклов измерений и на основании их анализа сделать вывод о необходимости продолжения работ.

При строительстве этих водохранилищ были созданы локальные геодезической точки контроля, расположенные как на берегу, так и в теле плотины (в зоне дренажа). Контроль устойчивости производился с помощью высокоточных лазерных дальномеров и оптических теодолитов. Высотная составляющая определялась методом геометрического нивелирования. Для этих целей

разработаны специальные геодезические центры. Для выполнения плановых наблюдений разработаны специальные геодезические точки, а для выполнения нивелировочных работ – глубинные реперы, монолиты которых заглублены и соединены с коренной породой.

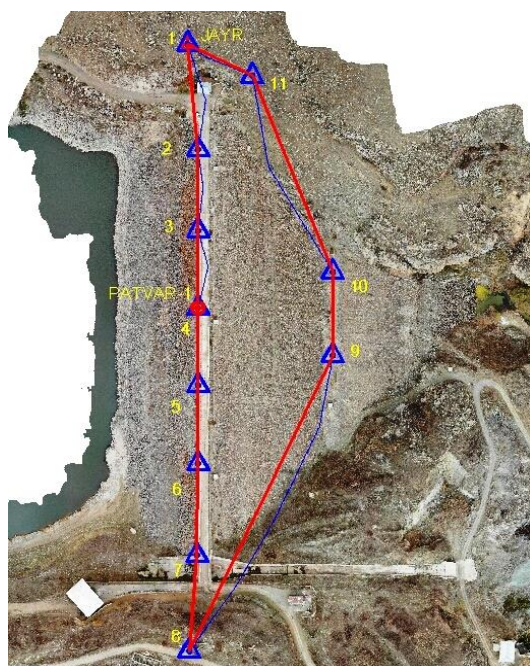


Рис. 4. Схема геодезического обоснования для мониторинга плотины Спандарянского водохранилища.

Условные обозначения:

- – стационарные базовые станции GNSS;
- ▲ – точки тахеометрической сети сгущения;
- – направление тахеометрического хода;
- цифры – номера тахеометрических точек;
- – направление хода нивелирования II класса.

В настоящее время для всех трех водохранилищ созданы современные сети управления GNSS с помощью передовых спутниковых технологий. На каждой плотине установлено по две двухчастотные спутниковые приемные станции GNSS: одна – на скальном устойчивом откосе левого или правого тела плотины, а другая – в верхней части центра плотины [2].

Основные измерения необходимо проводить через определенные промежутки времени циклами продолжительностью 6–8 ч, длительностью наблюдения 15 с в статическом режиме. Повторные наблюдения необходимо проводить каждые 5 месяцев по 5 циклов. Данные должны храниться в памяти и передаваться через телефонные модемы один раз в сутки (если автономная передача невозможна, то перед каждым циклом данные должны сбрасываться с карты памяти приемника). Передаваемые данные, в случае необходимости, должны пройти пост-обработку и уравнивание.

Спутниковые геодезические наблюдения и тахеометрические измерения на примере циклического определения горизонтальных смещений плотины Спандарянского водохранилища и прилегающих гидротехнических сооружений включают 5 точек на земляном валу, 3 точки на внутренней стороне, 2 точки (по 1 точке) на скале на правом берегу и в центральной части скального участка левого берега и плотины, а также 2 опорные точки спутниковой геодезической навигационной системы GNSS [2].

Базовая станция “Rock-1”, расположенная на скальной насыпи левого берега, послужила опорной точкой для прокладывания замкнутого тахеометрического хода. Ход состоял из 10 точек тахеометрической сети сгущения. В первом цикле все 10 точек мониторинга были уравновешены относительно исходной точки “Rock-1” и получили начальные координаты для сравнения с данными, полученными в последующих циклах. В табл. 4 приведены результаты указанных выше исходных координат.

Таблица 4

Координаты точек тахеометрического хода

Пункт	Вид пункта	Первый цикл	
		уравненные по оси x	уравненные по оси y
“Rock-1”	GNSS	4391225,2254	8572834,3937
2	тахеом. точка	4391157,3290	8572841,2083
3	тахеом. точка	4391105,5120	8572841,1150
4	тахеом. точка	4391055,4712	8572841,1701
5	тахеом. точка	4391005,8631	8572841,0611
6	тахеом. точка	4390955,8320	8572840,9648
7	тахеом. точка	4390896,6799	8572840,4674
8	тахеом. точка	4390835,2038	8572835,3478
9	тахеом. точка	4391025,4136	8572928,7245
10	тахеом. точка	4391078,7711	8572928,7234
11	тахеом. точка	4391204,7552	8572876,4942
“Rock-1”	GNSS	4391225,2254	8572834,3937

В табл. 5 приведены расхождения приращений, полученных в результате уравнивания балансировки координат точек всех 5 циклов по сравнению с первым исходным циклом.

Таблица 5

Расхождение приращений уравненных координат циклов относительно первого цикла

Пункт	Вид пункта	1–2 Цикл		1–3 Цикл		1–4 Цикл		1–5 Цикл		Сред. разница	
		Dx	Dy	Dx	Dy	Dx	Dy	Dx	Dy	Dx	Dy
“Rock-1”	GNSS	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	тахеом. точка	0,0011	0,0009	0,0011	0,0008	0,0006	-0,0012	0,0009	0,0014	0,0009	0,0005
3	тахеом. точка	-0,0005	-0,0006	-0,0004	-0,0008	-0,0007	-0,0003	-0,0002	-0,0006	-0,0004	-0,0006
4	тахеом. точка	-0,0022	0,0004	-0,0021	0,0002	-0,0020	0,0016	-0,0006	0,0015	-0,0017	0,0009
5	тахеом. точка	-0,0016	-0,0018	-0,0014	-0,0022	-0,0029	0,0002	-0,0016	-0,0008	-0,0019	-0,0011
6	тахеом. точка	-0,0010	0,0011	-0,0008	0,0007	-0,0009	0,0016	-0,0004	0,0000	-0,0007	0,0008
7	тахеом. точка	-0,0009	0,0008	-0,0007	0,0003	-0,0014	0,0018	-0,0002	0,0015	-0,0008	0,0011
8	тахеом. точка	-0,0002	-0,0004	0,0001	-0,0010	-0,0015	-0,0004	0,0003	-0,0006	-0,0003	-0,0006
9	тахеом. точка	-0,0002	0,0001	0,0002	-0,0008	-0,0032	0,0011	-0,0006	0,0012	-0,0010	0,0004
10	тахеом. точка	-0,0026	0,0009	-0,0021	-0,0001	-0,0033	-0,0011	-0,0017	0,0017	-0,0025	0,0003
11	тахеом. точка	-0,0007	-0,0001	-0,0001	-0,0013	-0,0037	-0,0010	-0,0006	0,0000	-0,0013	-0,0006
“Rock-1”	GNSS	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Суммарная разница		-0,0090	0,0012	-0,0062	-0,0041	-0,0190	0,0024	-0,0048	0,0051	-0,0097	0,0011

Заключение. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшие расхождения числовых значений с первым циклом наблюдались на 9-й, 10-й и 11-й точках приращения координат Dx 4-го цикла, что свидетельствует о том, что наблюдается разница более 3 мм в отклонении вектора на северо-запад в сторону левого берега водохранилища. Общая разница суммы Dx для того же 4-го цикла составляет 19 мм. Необходимо обратить внимание на то, что вышеперечисленные точки расположены не на верхнем, а на нижнем уровне водохранилища.

На основании полученных результатов можно констатировать, что циклические расхождения находятся в пределах допустимых значений и внешние опасные деформации отсутствуют. Данный предложенный технологический метод полностью заменяет традиционный метод определения деформаций и способствует оперативному реагированию на динамику сдвига земной коры на данной территории.

Поступила 14.02.2023

Получена с рецензии 04.05.2023

Утверждена 25.05.2023

ЛИТЕРАТУРА

1. *Техническая реализация современного мониторинга 3-х земляных дамб компании ЗАО “Контур Глобал Гидрокаскад”, проект “Модуль”*. Ереван (2021), 87.
2. *Построение геодезической сети в государственной спутниковой системе координат WGS-84*. Инструкция, утвержденная председателем Комитета Кадастра РА 23.04.2007 приказом № 88 Н.
3. *Соблюдение технических правил техники безопасности при проведении топографо-геодезических работ*. Инструкция, утвержденная приказом председателя Комитета Кадастра РА № 516 от 14.08.2001.
4. Маркарян В.А., Голубинка Ю., Товмасын С.В. *Об использовании новейших геодезических методов для определения объема накопившихся в водохранилищах наносов*. XVIII Международный научно-технический симпозиум. Алушта (Крым) (2013), 306–311.
5. Хамчук А.П., Чупин Г.А. *Динамическое тестовое обследование плотин под воздействием эксплуатационных динамических нагрузок*. *Гидротехническое строительство* 10 (2003), 26–36.
6. Гуляев В.П. *Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений*. Новосибирск, СГГА (2008), 256.
7. Trimble R7 GNSS Receiver. Trimble R5 GPS Receiver. User Guide Version 4.10. Revision A. USA, European Union (2009).
[URL:http://www.al-top.com/sites/default/files/0Trimble_R7-R5_ENG.pdf](http://www.al-top.com/sites/default/files/0Trimble_R7-R5_ENG.pdf)
8. Dunicliff J. *Geotechnical Monitoring Programmes for Embankment Dams*. *Water Power & Dam Construction* 41 (1989), 12–16.
9. Fell R., MacGregor P., et al. *Geotechnical Engineering of Dams*. Leiden, London, New York, Philadelphia, Singapore, A.A. Balkema Publishers (2005).
10. Kutzner C. *Earth & Rockfill Dams: Principles for Design and Construction*. Routledge Chapman & Hall (1997).
11. *Геодезические работы в строительстве РАМН (13.01.2022)*. Строительные нормы республики Армения от 29 июля 2022 г. № 17-N.
12. *СНиП III-2-75 (нормы и правила)*. Государственный комитет Совета министров СССР по делам строительства.

Լ. Վ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Ժ. Ս. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Վ. Հ. ՂԱՐԻԲՅԱՆ,
Ա. Ա. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Ս. Վ. ԹՈՎՄԱՍՅԱՆ

ՀՈՂԱՅԻՆ ՊԱՏՎԱՐՆԵՐՈՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ
ՈՐՈՇ ՋՐԱՄԲԱՐՆԵՐԻ ԺԱՄԱՆԱԿԱԿԻՑ ԳԵՈԴԵՉԻԱԿԱՆ
ՄՇՏԱԴԻՏԱՐԿՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Ներկայացված է ՀՀ Սյունիքի մարզի Սպանդարյան, Շամբ և Տոլորս ջրամբարների, Որոտան գետի վրա տեղակայված 3 հիդրոկայանների և Տաթևի ջրամբարի պատվարների տարածքում հետազոտությունների արդյունքները: Գեոդեզիական տեխնոլոգիաների կիրառմամբ հնարավոր է իրականացնել ջրային համակարգերի ամբողջական քարտեզագրում և տվյալների բազայի ստեղծում: Կառավարման գործընթացում արագ արձագանքման անհրաժեշտությունն անհնար է առանց տեղեկատվական բազաների և համապատասխան գործիքների: Միջազգային փորձը ցույց է տալիս, որ այս տեխնոլոգիաները պարտադիր պայման են ջրային համակարգերի կառավարման գործընթացում: Բարձր տեխնոլոգիական աշխատանքները թույլ են տալիս բարձրացնելու չափումների ճշգրտությունը, խնայելու աշխատանքի ժամանակը և օպտիմալացնելու ֆինանսական ծախսերը:

L. V. MANUKYAN, J. S. MARGARYAN, V. H. GHARIBYAN,
A. A. MARGARYAN, S. V. TOVMASYAN

ANALYSIS OF THE RESULTS OF MODERN GEODETIC MONITORING
OF EARTH DAMS OF SOME RESERVOIRS
OF THE REPUBLIC OF ARMENIA

Summary

The results of research and analysis of data obtained by geodetic observations of reservoirs located in the Syunik Region on the Vorotan River, represented by the Spandaryan, Shamb and Tolors reservoirs and the Tatev daily regulating reservoir, are presented. Using geodetic technologies provides an opportunity to conduct a complete cartography of water systems and create a database. In the management process, it is impossible to respond rapidly without the help of a database and corresponding tools. As demonstrated by international experience, these technologies are mandatory in the management process of water systems. High-tech work can improve the accuracy of observations and measurements, as well as optimize expenses and time.