

На правах рукописи

МАНУЭЛЬ ТРЕХО СОТО

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА
ОСАДКАМИ И СМЕЩЕНИЯМИ КРУПНЫХ
ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ СПУТНИКОВЫМИ
МЕТОДАМИ**

Специальность: 25.00.32 – Геодезия

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2007

Работа выполнена на кафедре прикладной геодезии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Клюшин Евгений Борисович.
Официальные оппоненты	доктор технических наук Баранов Владимир Николаевич кандидат технических наук Куприянов Андрей Олегович
Ведущая организация	Государственный Специализированный Проектный Институт (ГСПИ)

Защита диссертации состоится « 19 » апреля 2007 г. в 12.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., 4, МИИГАиК, ауд. 321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК.

Автореферат разослан « 18 » марта 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Разработка эффективных методов выявления и прогнозирования деформаций инженерных сооружений является актуальной, поскольку ее успешное решение и последующее развитие вносят важный вклад в обеспечение надежности, долговечности и безопасности эксплуатации ответственных сооружений. Решение этой задачи создает условия для повышения эффективности использования капитальных вложений в строительство, помогает рационально планировать различные регламентные работы, в том числе геодезические наблюдения за деформацией сооружений, а также приносит определенный социальный эффект.

Строительство больших технических структурных сооружений типа плотин, мостов и высотных зданий является существенным для развития любой нации. Значительные деформации инженерных сооружений, близких к критическим, потенциально может вызывать гибель большого количества людей и сильные разрушения. Сохранность и долговечность сооружений – важнейшая народнохозяйственная задача, и она зависит не только от научно-обоснованной конструкции этих сооружений, но также во многом и от полноты исследования грунтов, на которых возводятся сооружения, от учета влияния на сооружения внешней среды и, особенно, от своевременной постановки и правильного выполнения систематических наблюдений за состоянием сооружений. Следовательно, безопасность этих работ, особенно в случаях с плотинами, требует периодического контроля и всестороннего анализа их структурного состояния, основанного на большом наборе переменных, которые вносят свой вклад в эти деформации. Деформацию данных структур определяют несколько факторов. Самые важные из них – это результаты переменных усилий и напряжений, развитых в структуре из-за эффектов местных движений земной коры. Движения земной коры вызывают изменения в относительном местоположении пунктов, расположенных на самой плотине или около нее. Другие определяющие факторы включают в себя: тип материалов строительства, силу ветра, изменение температур, усадку почв и колебания из-за движе-

ния транспорта. Результаты наблюдений за осадками и смещениями инженерных сооружений геодезическими методами должны удовлетворять предъявляемым требованиям в отношении их полноты, своевременности и точности.

С момента появления ГЛОНАСС и GPS, а также на основе непрерывного процесса совершенствования технологии спутниковых измерений проблемы прогнозирования деформаций инженерных сооружений стали решаться на качественно новой основе. При использовании спутниковых методов точность координатных определений в сочетании с оперативностью получения конечных результатов определяются степенью необходимой детальности исследований, а также экономическими возможностями организации данного вида работ. Развитие высокоэффективных спутниковых методов координатных определений на основе применения глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS принципиальным образом изменяют технологию и точность определения геодезических координат и принципы построения геодезических сетей, являющихся фактической реализацией систем координат. По результатам спутниковых измерений одновременно определяются точные значения координат как в плане, так и по высоте. Поэтому современные спутниковые методы координатных определений на основе применения глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС создают условия для создания плановой и высотной основы в виде единой совокупности геодезических пунктов. Сложность решения этой проблемы состоит в том, что по спутниковым измерениям непосредственно определяется геодезическая (эллипсоидальная) высота, т.е. высота точки земной поверхности над отсчетным эллипсоидом. При использовании спутниковых методов геодезические высоты определяются непосредственно по результатам измерений. Обработка спутниковых данных не требует редукции на поверхность эллипсоида.

Внедрение новых методов и средств геодезических измерений должно сопровождаться и новой методикой обработки результатов измерений. Только комплексное решение задачи позволит добиться максимальной эффективности и будет отвечать современным требованиям.

Цель работы:

Основной целью работы является разработка методики анализа результатов наблюдений за осадками и смещениями крупных электроэнергетических объектов, расположенных в Мексике, с применением спутниковых методов измерений, научное обоснование методики и определение путей их практической реализации.

Научная новизна работы:

В результате выполненного анализа особенностей построения локальных геодезических сетей спутниковыми методами, обеспечивающих оперативность выполнения необходимых измерений и требуемый высокий уровень точности:

1. Выполнена теоретическая и экспериментальная проверка эффективности предложенных математических методов оценки точности спутниковых координатных определений.
2. Установлено, что в условиях недостаточной геодезической обеспеченной в некоторых районах Мексики наибольшей оперативностью и экономичностью для определения деформаций электроэнергетических объектов является метод спутниковых измерений.
3. Разработан алгоритм определения средних квадратических ошибок топоцентрических координат и установлена зависимость между малыми изменениями декартовых топоцентрических координат ξ , η и ζ и геоцентрических координат.

Практическая значимость работы:

Основные результаты выполненных исследований предложены для использования в геодезической службе Мексики. Установленная практическая связь прямоугольных геоцентрических и топоцентрических координат с зонами деформаций уже сейчас может быть использована для переосмысления существующего перспективного плана выявления разных видов деформаций в районах электроэнергетических объектов на территории

Мексики.

Разработанные в диссертации принципы применения топоцентрических прямоугольных координат с использованием современных спутниковых технологий ориентированы на реализацию в работах по изучению и выявлению деформационных процессов крупных инженерных сооружений в условиях Мексики, а также для создания высокоэффективной системы геодезического обеспечения.

Предложенный метод оценки точности результатов геодезических измерений для прогнозирования деформаций может служить основой для организации геодезического мониторинга на территории Мексики, главная цель которого – выявление до и после наводнений в зоне водохранилищ изменений уровней воды.

На конкретном объекте (плотина «Саналона», Мексика) был проведен цикл измерений за деформацией тела плотины, на основе которых с использованием предложенной методики сделаны выводы об устойчивости исследуемого объекта.

Публикации:

По результатам выполненных исследований по теме диссертации автором опубликованы четыре статьи, а также (в соавторстве) тезисы доклада на международной конференции.

Структура и объем диссертации:

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов с подразделами, заключения и списка литературы. Общий объем работы – 120 стр. Диссертация содержит 14 таблиц и 18 рисунков. Список литературы составляет 52 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Обоснована актуальность решаемой задачи, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

ГЛАВА 1. ДЕФОРМАЦИИ КРУПНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Дается общая классификация геодезических задач и обзор традиционных методов их решения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений. Особое внимание уделяется анализу современных концепций природы деформаций и причин их возникновения.

При изучении различного рода деформаций, возникающих в земной коре, а также в основаниях крупных инженерных сооружениях и на других объектах, появляется необходимость выполнения достаточно частых (а иногда и непрерывных во времени) измерений. Традиционные геодезические методы в организации мониторинговых измерений на объектах больших размеров требуют больших затрат средств и времени. Целесообразность использования GPS-измерений при изучении деформаций на различных объектах, в первую очередь, связана с высокой экономической эффективностью спутниковых методов измерений в сочетании с высокой точностью измерений.

В настоящее время спутниковые методы измерений находят все более и более широкое применение для изучения и мониторинга деформаций крупных инженерных сооружений. При этом необходимо учитывать, что нормальная высота пунктов определяются менее точно, кроме того, точность определения изменений координат пунктов зависит от широты исследуемого объекта. Кроме того, недостаточное число наблюдаемых спутников, вызванных экранировкой сигнала местными предметами, ограничивают возможность использования спутниковых методов.

ГЛАВА 2. СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Даны основные характеристики существующих в настоящее время космических навигационных систем, включая подробное описание спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС, а также находящейся в разработке системы GALILEO. Приводится описание основных методов измерений и определения положения пунктов спутниковыми методами.

В качестве опорных пунктов с известными координатами используются навигационные спутники, а в качестве устройства для измерения координат – антенна с электронным вычислительным блоком, так называемый приемник – эта часть называется «Сектор потребителя». При этом вычисляются расстояния от объекта на поверхности Земли или в воздухе до видимых спутников.

Для решения большинства геодезических задач основная роль отводится относительным режимам (дифференциальным), так как они существенно отличаются по точности определения приращений координат. Точность методов СРНС (спутниковая радионавигационная система) зависит от расстояния между приемником и опорной станцией, от числа спутников на орбите, от расположения спутников относительно приемников, от типа и точностных возможностей приемника и от типа местности, а также от времени наблюдений. СРНС обеспечивает исключительные возможности для создания геодезических сетей различного назначения, что представляется более экономичным и быстрым. СРНС работает практически в любых погодных условиях и не требует взаимной видимости между приемниками. Использование СРНС является относительно дешевой технологией, и ее использование не требует высококвалифицированных специалистов в полевых условиях. Основной недостаток применения СРНС заключается в том, что в период ее работы на небе должно находиться, по меньшей мере, четыре спутника и должно обеспечиваться отсутствие помех, создаваемых, например, высотными препятствиями и обильной лесной растительностью территории.

Фазовые методы измерений являются основными при решении разнообразных геодезических задач с помощью спутниковых систем, преду-

смастривающих обеспечение высокой точности измерений.

Основное внимание в данной главе уделено подходам к решениям, ориентированным на минимизацию влияния основных источников ошибок спутниковых измерений.

При изучении проблемы, касающейся учета влияния ионосферы на результаты спутниковых измерений, безоговорочного предпочтения заслуживают двухчастотные методы, основные особенности которых достаточно подробно изложены в опубликованных работах.

Изложенные предпосылки принимались во внимание как при проведении соответствующих измерений, так и при организации производственного мониторинга в районе плотины «Саналона», Мексика. К особенностям организации спутниковых наблюдений следует отнести такие факторы, как оптимальная длительность сеанса наблюдений, выбор приемников с соответствующими техническими характеристиками, интервал времени, в течение которого производят измерения с оптимальными значениями геометрического фактора.

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА ОСАДКАМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ КРУПНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В главе даются основные рекомендации по наблюдениям за осадками и деформациями крупных сооружений, периодичности и точности измерений. При внедрении спутниковых технологий в топографо-геодезическое производство резко изменились организационные и технологические принципы проведения полевых и камеральных работ, что дает основание говорить о революционных изменениях в области геодезических измерений. В настоящее время спутниковые методы измерений находят все более и более широкое применение для изучения и мониторинга деформаций крупных инженерных сооружений. При этом необходимо учитывать, что нормальная высота пунктов определяются менее точно, кроме того, точность определения изменений координат пунктов зависит от широты объекта.

На опыте работ показано, что при благоприятном расположении

спутников и при исключении многолучевого распространения сигнала возможно достижение высокой точности вплоть до нескольких миллиметров. Рассматривается алгоритм применения топоцентрических прямоугольных координат для изучения деформаций гидротехнических сооружений. Осадки и горизонтальные смещения наблюдаемых точек на сооружении определяют как разность их координат, полученных в различные моменты времени в единой системе координат. При анализе смещений пунктов в плане и по высоте целесообразно использовать топоцентрическую прямоугольную систему координат.

В криволинейной системе координат положение точки P характеризуется широтой B , долготой L и геодезической высотой H .

Соотношения между геоцентрическими декартовыми координатами и эллипсоидальными криволинейными координатами имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= (N+H)\cos B\cos L \\ Y &= (N+H)\cos B\sin L \\ Z &= (N+H)\sin B - e^2 NS \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где N - радиус кривизны нормального сечения эллипсоида в плоскости первого вертикала, который равен

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (2)$$

где a - большая полуось эллипсоида,

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \text{ - первый эксцентриситет;} \quad (3)$$

H - геодезическая высота.

Введем обозначение:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = (N + H)\cos B, \quad (4)$$

геодезическая высота вычисляется по формуле

$$H = \frac{R}{\cos B} - N. \quad (5)$$

Для того чтобы вычислить геодезическую высоту H , необходимо знать широту B . Для вычисления широты удобно воспользоваться формулой Боуринга:

$$\operatorname{tg} B = \frac{Z}{R} \cdot \frac{r^3 + be'^2 Z^2}{r^3 - be^2 (1 - e^2) R^2}, \quad (6)$$

где $r = \sqrt{Z^2 + (X^2 + Y^2)(1 - e^2)}$.

Долгота L вычисляется по формуле:

$$\operatorname{tg} L = \frac{Y}{X}. \quad (7)$$

Для перехода от геоцентрических координат к топоцентрическим координатам необходимо выбрать один пункт за исходный. При решении геодезических задач между точками в пространстве используют систему топоцентрических декартовых координат, начало координат находится в исходной точке P_i (B_i, L_i, H_i), расположенной обычно на земной поверхности. Ось ζ расположена на продолжении нормали к поверхности эллипсоида в точке P_i , ось ξ расположена в плоскости меридиана точки P_i перпендикулярно к оси ζ и направлена в сторону оси вращения эллипсоида, ось η перпендикулярна к осям ξ и ζ и направлена в сторону увеличения долготы.

Связь между декартовыми топоцентрическими и декартовыми геоцентрическими координатами устанавливается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} X &= [(\zeta + N_i + H_i) \cos B_i - \xi \sin B_i] \cos L_i - \eta \sin L_i \\ Y &= [(\zeta + N_i + H_i) \cos B_i - \xi \sin B_i] \sin L_i + \eta \cos L_i \\ Z &= (\zeta + N_i + H_i) \sin B_i + \xi \cos B_i - e^2 N_i \sin B \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Чтобы найти обратные зависимости, решим эти уравнения относительно ξ , η и ζ . В результате решения получим

$$\xi_{ij} = (Z_j + e^2 N_i \sin B_i) \cos B_i - (X_j \cos L_i + Y_j \sin L_i) \sin B_i; \quad (9)$$

$$\eta_{ij} = Y_j \cos L_i - X_j \sin L_i; \quad (10)$$

$$\zeta_{ij} = (Z_j + e^2 N_i \sin B_i) \sin B_i + (X_j \cos L_i + Y_j \sin L_i) \cos B_i - (N_i + H_i). \quad (11)$$

При использовании спутниковой навигационной системы GPS координаты земных объектов получаются в системе координат WGS-84. При выполнении геодезических работ обычно используются местные системы координат. При обработке результатов спутниковых измерений при наблюдениях за деформациями инженерных сооружений возникает необ-

ходимость отделить осадки наблюдаемых объектов от горизонтальных смещений, поэтому система координат WGS-84 не полностью отвечает поставленным задачам. В связи с этим в работе рассмотрен процесс определения средних квадратических ошибок определения топоцентрических координат.

С этой целью установим зависимость между малыми изменениями декартовых топоцентрических координат ξ , η и ζ и геоцентрических координат начальной точки 1 и конечной точки 2.

Дифференцируем сначала равенство

$$\xi_{12} = (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) \cos B_1 - (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \sin B_1.$$

Переменными величинами являются координаты пунктов в геоцентрической системе координат X_1, Y_1, Z_1 и X_2, Y_2, Z_2 :

$$\begin{aligned} d\xi_{12} = & \left[-\sin B_1 (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) + e^2 N_1 \cos B_1^2 - \cos B_1 (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \right] \frac{dB_1}{\rho} + \\ & + [X_2 \sin L_1 - Y_2 \cos L_1] \frac{dL_1}{\rho} + e^2 \sin B_1 \cos B_1 dN_1 - \\ & - \cos L_1 \sin B_1 dX_2 - \sin L_1 \sin B_1 dY_2 + \cos B_1 dZ_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Для нахождения зависимости дифференциала широты от изменений декартовых координат дифференцируем формулу Боуринга (6):

$$\frac{dB_1}{\rho \cos^2 B_1} = d\left(\frac{Z_1}{R}\right) \cdot \frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{r^3 - be^2 (1 - e^2) R^2} + \frac{Z_1}{R} \cdot d\left(\frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{r^3 - be^2 (1 - e^2) R^2}\right). \quad (13)$$

В свою очередь

$$d\left(\frac{Z_1}{R}\right) = \frac{dZ_1}{R} - \frac{Z_1}{R^2} dR. \quad (14)$$

Величину dR определим из $R = \sqrt{X^2 + Y^2} = (N + H) \cos B$:

$$dR = \frac{X_1}{R} dX_1 + \frac{Y_1}{R} dY_1,$$

следовательно,

$$d\left(\frac{Z_1}{R}\right) = \frac{dZ_1}{R} - \frac{Z_1}{R^2} \left(\frac{X_1}{R} dX_1 + \frac{Y_1}{R} dY_1 \right) = -\frac{X_1 Z_1}{R^3} dX_1 - \frac{Y_1 Z_1}{R^3} dY_1 + \frac{dZ_1}{R}. \quad (15)$$

Зависимость изменения широты пункта от изменений декартовых

геоцентрических координат окончательно представим в виде:

$$\begin{aligned}
 \frac{dB_1}{\rho} = & \left[\left[-\frac{Z_1}{R^3} \frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + a(x) \right] \cos B_1^2 X_1 dX_1 + \\
 & + \left[\left[-\frac{Z_1}{R^3} \frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + a(y) \right] \cos B_1^2 Y_1 dY_1 + \\
 & + \left[\left[\frac{1}{RZ_1} \frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + a(z) \right] \cos B_1^2 Z_1 dZ_1,
 \end{aligned} \tag{16}$$

где

$$\begin{aligned}
 a(x) = & \left[\left(\frac{Z_1}{R} \right) \frac{3r(1-e^2)}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] - \\
 & - \left[\left(\frac{Z_1}{R} \right) \left(\frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{(r^3 - be^2(1-e^2)R^2)^2} \right) [3r(1-e^2) - 2be^2(1-e^2)] \right]; \\
 a(y) = & \left[\left(\frac{Z_1}{R} \right) \frac{3r(1-e^2)}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] - \\
 & - \left[\left(\frac{Z_1}{R} \right) \left(\frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{(r^3 - be^2(1-e^2)R^2)^2} \right) [3r(1-e^2) - 2be^2(1-e^2)] \right]; \\
 a(z) = & \left[\left(\frac{Z_1}{R} \right) \frac{3r(1-e^2)}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] - \left[\left(\frac{Z_1}{R} \right) \left(\frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{(r^3 - be^2(1-e^2)R^2)^2} \right) 3r \right].
 \end{aligned}$$

Представим формулу (16) более компактно, с этой целью введем обозначения:

$$\begin{aligned}
 A = & \left[\left[-\frac{Z_1}{R^3} \frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + a(x) \right] \cos^2 B_1 X_1; \\
 B = & \left[\left[-\frac{Z_1}{R^3} \frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + a(y) \right] \cos^2 B_1 Y_1; \\
 C = & \left[\left[\frac{1}{RZ_1} \frac{r^3 + be'^2 Z_1^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + a(z) \right] \cos^2 B_1 Z_1.
 \end{aligned} \tag{17}$$

С учетом (17) формулу (16) представим в виде

$$\frac{dB_1}{\rho} = A dX_1 + B dY_1 + C dZ_1. \quad (18)$$

Для нахождения изменения долготы дифференцируем формулу $\operatorname{tg}L=Y/X$:

$$\frac{dL_1}{\rho} = \frac{\cos^2 L_1}{X_1} dY_1 - \frac{Y_1 \cos^2 L_1}{X_1^2} dX_1. \quad (19)$$

Зависимость изменения радиуса кривизна первого вертикала найдем из

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}},$$

следовательно

$$dN_1 = \frac{ae^2 \sin B_1 \cos B_1}{(1-e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} \cdot \frac{dB_1}{\rho} = \frac{ae^2 \sin 2B_1}{(1-e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} \cdot \frac{dB_1}{\rho}. \quad (20)$$

Подставив значения dB_1 , dL_2 и dN_1 в уравнение (12), имеем

$$d\xi_{12} = A_\xi dX_1 + B_\xi dY_1 + C_\xi dZ_1 + D_\xi dX_2 + E_\xi dY_2 + F_\xi dZ_2, \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} A_\xi &= \left[-\sin B_1 (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) + e^2 N_1 \cos B_1^2 - \cos B_1 (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \right] A - \\ &\quad - \left[[X_2 \sin L_1 - Y_2 \cos L_1] \sin B_1 \frac{Y_1 \cos^2 L_1}{X_1^2} \right] + \frac{a [e^2 \sin 2B_1]^2}{(1-e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} A; \\ B_\xi &= \left[-\sin B_1 (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) + e^2 N_1 \cos B_1^2 - \cos B_1 (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \right] B + \\ &\quad + \left[[X_2 \sin L_1 - Y_2 \cos L_1] \sin B_1 \frac{\cos^2 L_1}{X_1^2} \right] + \frac{a [e^2 \sin 2B_1]^2}{(1-e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} B; \\ C_\xi &= \left[-\sin B_1 (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) + e^2 N_1 \cos B_1^2 - \cos B_1 (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \right] C + \\ &\quad + \frac{a [e^2 \sin 2B_1]^2}{(1-e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} C; \end{aligned}$$

$$D_\xi = -\cos L_1 \sin B_1; \quad E_\xi = -\sin L_1 \sin B_1; \quad F_\xi = \cos B_1.$$

Аналогично дифференцируем равенство (10):

$$d\eta_{12} = dY_2 \cos L_1 - Y_2 \sin L_1 dL_1 - dX_2 \sin L_1 - X_2 \cos L_1 dL_1. \quad (22)$$

С учетом (19) представим (22) в следующем виде:

$$d\eta_{12} = \left[\frac{Y_1 X_2 \cos^3 L_1 + Y_1 Y_2 \sin L_1 \cos^2 L_1}{X_1^2} \right] dX_1 + \left[-\frac{X_2 \cos^3 L_1}{X_1} - \frac{Y_2 \sin L_1 \cos^2 L_1}{X_1} \right] dY_1 - \sin L_1 dX_2 + \cos L_1 dY_2.$$

Введем обозначения и представим (22) в виде:

$$d\eta_{12} = A_\eta dX_1 + B_\eta dY_1 + C_\eta dX_2 + D_\eta dY_2, \quad (23)$$

где

$$A_\eta = \left[\frac{Y_1 X_2 \cos^3 L_1 + Y_1 Y_2 \sin L_1 \cos^2 L_1}{X_1^2} \right], \quad B_\eta = \left[-\frac{X_2 \cos^3 L_1}{X_1} - \frac{Y_2 \sin L_1 \cos^2 L_1}{X_1} \right],$$

$$C_\eta = -\sin L_1, \quad D_\eta = \cos L_1.$$

Дифференцируя уравнение (11), получим:

$$d\zeta_{12} = \left[\cos B_1 (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) + e^2 N_1 \sin B_1 \cos B_1 - \sin B_1 (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \right] \frac{dB_1}{\rho} +$$

$$+ \left[-X_2 \cos B_1 \sin L_1 + Y_2 \cos B_1 \cos B_1 \right] \frac{dL_1}{\rho} + e^2 \sin^2 B_1 dN_1 +$$

$$+ \cos L_1 \cos B_1 dX_2 + \sin L_1 \cos B_1 dY_2 + \sin B_1 dZ_2 - dN_1 - dH_1. \quad (24)$$

Для определения величины dH_1 дифференцируем уравнение

$$H = \frac{R}{\cos B} - N,$$

следовательно,

$$dH_1 = \frac{X_1}{R \cos B_1} dX_1 + \frac{Y_1}{R \cos B_1} dY_1 + \frac{\sin B_1 R}{\cos^2 B_1} \frac{dB_1}{\rho} - \frac{ae^2 \sin 2B_1}{(1 - e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} \cdot \frac{dB_1}{\rho}. \quad (25)$$

Подставив значения (19), (20) и (25) в уравнение (24), получим дифференциальную формулу

$$d\zeta_{12} = A_\zeta dX_1 + B_\zeta dY_1 + C_\zeta dZ_1 + D_\zeta dX_2 + E_\zeta dY_2 + F_\zeta dZ_2, \quad (26)$$

где

$$A_\zeta = \left[\cos B_1 (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) + e^2 N_1 \sin B_1 \cos B_1 - \sin B_1 (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \right] A -$$

$$- \left[-X_2 \cos B_1 \sin L_1 + Y_2 \cos B_1 \cos B_1 \right] \frac{Y_1 \cos^2 L_1}{X_1^2} + e^2 \sin^2 B_1 \frac{ae^2 \sin 2B_1}{(1 - e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} A +$$

$$+ \left[-\frac{X_1}{R \cos B_1} - \frac{A \sin B_1 R}{\cos^2 B_1} \right];$$

$$\begin{aligned}
B_{\zeta} &= \left[\cos B_1 (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) + e^2 N_1 \sin B_1 \cos B_1 - \sin B_1 (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \right] B + \\
&+ \left[-X_2 \cos B_1 \sin L_1 + Y_2 \cos B_1 \cos B_1 \right] \frac{\cos^2 L_1}{X_1} + e^2 \sin^2 B_1 \frac{ae^2 \sin 2B_1}{(1 - e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} B + \\
&+ \left[-\frac{X_1}{R \cos B_1} - \frac{B \sin B_1 R}{\cos^2 B_1} \right]; \\
C_{\zeta} &= \left[\cos B_1 (Z_2 + e^2 N_1 \sin B_1) + e^2 N_1 \sin B_1 \cos B_1 - \sin B_1 (X_2 \cos L_1 + Y_2 \sin L_1) \right] C + \\
&+ e^2 \sin^2 B_1 \frac{ae^2 \sin 2B_1}{(1 - e^2 \sin^2 B_1)^{3/2}} C - \frac{C \sin B_1 R}{\cos^2 B_1}; \\
D_{\zeta} &= \cos L_1 \cos B_1; \quad E_{\zeta} = \sin L_1 C \cos B_1; \quad F_{\zeta} = \sin B_1.
\end{aligned}$$

Используя ранее полученные выражения (21), (23) и (26), получим следующие дифференциальные формулы:

$$\begin{aligned}
d\xi_{12} &= A_{\xi} dX_1 + B_{\xi} dY_1 + C_{\xi} dZ_1 + D_{\xi} dX_2 + E_{\xi} dY_2 + F_{\xi} dZ_2; \\
d\eta_{12} &= A_{\eta} dX_1 + B_{\eta} dY_1 + C_{\eta} dX_2 + D_{\eta} dY_2; \\
d\zeta_{12} &= A_{\zeta} dX_1 + B_{\zeta} dY_1 + C_{\zeta} dZ_1 + D_{\zeta} dX_2 + E_{\zeta} dY_2 + F_{\zeta} dZ_2.
\end{aligned} \tag{27}$$

Переходя к средним квадратическим ошибкам, окончательно получим:

$$\begin{aligned}
m_{\xi_{12}}^2 &= A_{\xi}^2 m_{X_1}^2 + B_{\xi}^2 m_{Y_1}^2 + C_{\xi}^2 m_{Z_1}^2 + D_{\xi}^2 m_{X_2}^2 + E_{\xi}^2 m_{Y_2}^2 + F_{\xi}^2 m_{Z_2}^2; \\
m_{\eta_{12}}^2 &= A_{\eta}^2 m_{X_1}^2 + B_{\eta}^2 m_{Y_1}^2 + C_{\eta}^2 m_{X_2}^2 + D_{\eta}^2 m_{Y_2}^2; \\
m_{\zeta_{12}}^2 &= A_{\zeta}^2 m_{X_1}^2 + B_{\zeta}^2 m_{Y_1}^2 + C_{\zeta}^2 m_{Z_1}^2 + D_{\zeta}^2 m_{X_2}^2 + E_{\zeta}^2 m_{Y_2}^2 + F_{\zeta}^2 m_{Z_2}^2.
\end{aligned} \tag{28}$$

Характерной особенностью этих формул является то, что в них используются, кроме геодезических координат B_1 , L_1 , H_1 исходной точки, координаты пунктов 1 и 2 в геоцентрической системе координат X_1 , Y_1 , Z_1 и X_2 , Y_2 , Z_2 . Точность этих формул зависит только от величины средних квадратических ошибок геоцентрических прямоугольных координат пунктов 1 и 2. На основе этого анализа сделан вывод о целесообразности использования топоцентрических прямоугольных координат для изучения деформаций энергетических объектов в условиях Мексики.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСАДОК И ДЕФОРМАЦИЙ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

С целью экспериментальной проверки предлагаемой методики анализа результатов спутниковых измерений за осадками и смещениями плотины «Саналона» были проведены работы по созданию геодезической сети спутниковыми методами в районе водохранилища.

Водоохранилище находится на западном склоне Сьерра Мадре Оксиденталь (западная горная цепь Мадре) в ее нижних отрогах. В данной местности преобладают вулканические горные породы, главным образом интрузивные базальты. Плотина Саналона (из грунтовых материалов) была построена на реке Тамазула в 32 км западнее от города Кульякан штата Синалоа (Мексика). Она представляет собой земляной вал, с левой стороны находится дамба и на правом краю водослив в виде веера со свободным гребнем. Слив плотины Саналона сделан в основном из гранита, который в своей верхней части имеет участок с ярко выраженной альтерацией, достигающей до глубин около 20,0 м.

Как уже отмечалось ранее, при решении данной проблемы установлена целесообразность применения сетевого метода построений. По такому принципу реализована, в частности, локальная сеть в зоне изучаемого объекта. Для иллюстрации на рис. 1 приведена схема расположения опорных и рабочих пунктов.

Рабочие пункты CASETA, B, A и TEMPLETE находятся на гребне плотины, а опорные - вне зоны деформации в стабильных и прочных породах.

На плотине «Саналона» за исходные пункты приняты точки: CACTUS, LOMA и CULEBRA, расположенные в нижнем бьефе за пределами зоны деформаций. Основное требование, предъявляемое к опорным пунктам и к технологии их закрепления на местности, сводится к обеспечению максимальной стабильности их местоположения в течение времени.

В общем комплексе экспериментальных исследований, относящихся к принципам построения локальных спутниковых геодезических сетей, должное внимание было уделено также обоснованию выбора длительности сеанса

наблюдений, которая позволяет производить спутниковые определения на требуемом уровне точности. В результате анализа опубликованных работ, было решено при производстве работ на плотине проводить сеансы наблюдений в течении одного часа. Измерения на всех пунктах производились двухчастотными геодезическими приемниками: 4 приемника «Z-200» фирмы ASTECH.

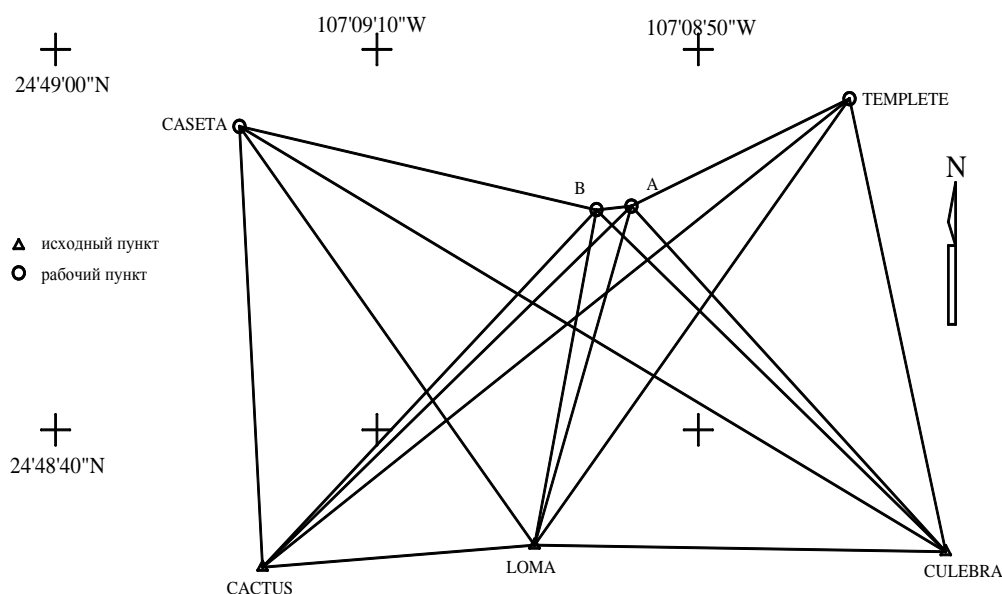


Рис. 1. Схема размещения геодезических пунктов для наблюдений за осадками и смещениями плотины «Саналона» Мексика

При условии соблюдения всех технических требований, погрешность взаимных положений двух смежных пунктов этими типами приемников не должна превышать 3-5 мм соответственно.

В таблице 1 приведены пространственные прямоугольные координаты X, Y, Z и геодезические эллипсоидальные координаты B_j, L_j, H_j рабочих пунктов первого цикла наблюдений, полученные в результате уравнивания базисных векторов с учетом их ковариационных матриц по рекуррентному алгоритму с контролем и исключением грубых ошибок.

Средние квадратические ошибки пространственных прямоугольных координат X, Y, Z рабочих пунктов из уравнивания даны в табл. 2

В таблице 3 приведены топоцентрические декартовы координаты рабочих пунктов и их оценка точности, выполненная по формулам (28), разработанным автором диссертационной работы.

Таблица 1

Рабочие пункты	$X, \text{ м}$	$Y, \text{ м}$	$Z, \text{ м}$
	Широта [С]	Долгота [З]	Высота, м
CASETA	-1708627,31678	-5535015,69923	2660596,89474
	24°48'55,95470"	107°09'18,5558"	129,87617
A	-1707987,94741	-5535267,22002	2660478,79319
	24°48'51,7647"	107°08'54,1609"	127,31152
B	-1708047,09865	-5535251,72771	2660473,04779
	24°48'51,5592"	107°08'56,3362"	127,29411
TEMP	-1707602,55450	-5535310,99717	2660636,99941
	24°48'57,4106"	107°08'40,5885"	128,54945

Таблица 2

Рабочие пункты	$m_X, \text{ мм}$	$m_Y, \text{ мм}$	$m_Z, \text{ мм}$
CASETA	3,6	8,1	3,3
A	3,4	7,4	3,4
B	2,9	6,8	3,7
TEMPLETE	3,3	8,3	4,2

Таблица 3

Рабочие пункты	$\xi, \text{ м}$	$m_\xi, \text{ мм}$	$\eta, \text{ м}$	$m_\eta, \text{ мм}$	$\zeta, \text{ м}$	$m_\zeta, \text{ мм}$
CASETA	677,40160	4,3	-515,66011	4,1	48,80393	7,2
A	548,46324	4,4	169,44743	4,7	46,27031	6,5
B	542,14086	3,5	108,35801	3,9	46,25478	5,4
TEMP	722,20086	4,1	550,61294	5,3	47,46935	7,1

Из табл. 2 и 3, видно, что точность топоцентрических прямоугольных координат после перехода от геоцентрических к топоцентрическим прямоугольным координатам остается практически одной и тоже.

Основная цель проведенных в этой области экспериментов состояла в практическом подтверждении эффективности действия изложенных вы-

ше предпосылок, изыскании надежных критериев оценки применения топоцентрических декартовых координат и конкретизации практической реализации рекомендуемых методов.

В таблице 4 приведены топоцентрические декартовые координаты, полученные по результатам наблюдений в период с января 2005 г. по июль 2006 г.

Таблица 4

Рабочие пункты	Дата наблюдений	Топоцентрические декартовые координаты рабочих пунктов		
		ξ , м	η , м	ζ , м
CAST	24-25.01.2005	677,40160	-515,66011	48,80393
	18-19.07.2005	,40722	,65871	,79822
	11-12.01.2006	,41047	,66721	,79617
	02-03.07.2006	,40474	,66301	,79432
A	24-25.01.2005	548,46324	169,44743	46,27031
	18-19.07.2005	,46075	,45062	,26715
	11-12.01.2006	,47016	,44621	,26426
	02-03.07.2006	,46383	,45164	,26241
B	24-25.01.2005	542,14086	108,35801	46,25478
	18-19.07.2005	,13518	,35019	,24935
	11-12.01.2006	,13987	,35211	,25116
	02-03.07.2006	,13629	,35651	,24675
TEMP	24-25.01.2005	722,20086	550,61294	47,46935
	18-19.07.2005	,20913	,61961	,46615
	11-12.01.2006	,20399	,61651	,46487
	02-03.07.2006	,20649	,62053	,46252

В табл. 5, 6, 7 и 8 приведены уклонения координат рабочих пунктов от начального момента в каждом цикле измерений.

Таблица 5

Рабочий пункт CAST				
№ Циклов	Интервал времени (сутки)	$\Delta\xi = \xi_i - \xi_0$, мм	$\Delta\eta = \eta_i - \eta_0$, мм	$\Delta\zeta = \zeta_i - \zeta_0$, мм
0	0	0	0	0
1	176	+5	+1	-6
2	354	+8	+7	-8
3	527	+3	+3	-10

Таблица 6

Рабочий пункт А				
№ Циклов	Интервал времени (сутки)	$\Delta\xi = \xi_i - \xi_0$ (в мм)	$\Delta\eta = \eta_i - \eta_0$ (в мм)	$\Delta\zeta = \zeta_i - \zeta_0$ (в мм)
0	0	0	0	0
1	176	-3	+4	-3
2	354	-2	-1	-6
3	527	+1	+5	-8

Таблица 7

Рабочий пункт В				
№ циклов	Интервал времени (сутки)	$\Delta\xi = \xi_i - \xi_0$ (в мм)	$\Delta\eta = \eta_i - \eta_0$ (в мм)	$\Delta\zeta = \zeta_i - \zeta_0$ (в мм)
0	0	0	0	0
1	176	-6	-8	-6
2	354	-1	-6	-4
3	527	-5	-2	-8

Таблица 8

Рабочий пункт ТЕМР				
№ циклов	Интервал времени (сутки)	$\Delta\xi = \xi_i - \xi_0$ (в мм)	$\Delta\eta = \eta_i - \eta_0$ (в мм)	$\Delta\zeta = \zeta_i - \zeta_0$ (в мм)
0	0	0	0	0
1	176	+8	+7	-3
2	354	+3	+3	-4
3	527	+5	+7	-7

Из рассмотрения этих графиков представляется возможным сделать выводы:

1. Средние квадратические погрешности определения смещений и осадок рабочих пунктов составили соответственно по осям $m_\xi \approx 4$ мм, $m_\eta \approx 4$ мм, $m_\zeta \approx 6$ мм, а предельные $\Delta_\xi \approx 12$ мм, $\Delta_\eta \approx 12$ мм, $\Delta_\zeta \approx 18$ мм.
2. Измеренные смещения и осадки рабочих пунктов находятся в пределах до 10 мм по всем осям, что меньше предельной погрешности измерений этих смещений и осадок всех наблюдаемых пунктов.

3. Из этого можно заключить, что деформации плотины, превосходящие точность измерений, не обнаружены.

Сравнение превышений между пунктами показало, что их изменения за последние 1,5 года находятся в пределах точности измерений (менее 5 мм).

Характерная особенность применения топоцентрических прямоугольных координат при изучении осадок и горизонтальных смещений инженерных сооружений состоит в том, что в отличие от остальных систем координат преобразование осуществляется сравнительно просто; так как формулы позволяют получить изменение координат рабочих пунктов относительно исходной точки, условная поверхность отсчета высоты проходит через исходную точку, исключается необходимость редуцирования результатов измерений на референц-эллипсоид, а потом на плоскость, точность вычисления координат после перехода от геоцентрических к топоцентрическим прямоугольным координатам не снижает точности геоцентрических координат после уравнивания.

Представленные в главе результаты опытно-производственных работ по геодезической спутниковой сети подтверждают эффективность применения спутниковых измерений на основе разработанной в диссертации методики и указывают, что не происходит деформаций тела плотины, превосходящих 10-15 мм, т.е. точность предполагаемого метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований, проведенных в настоящей диссертационной работе, представляется возможным сделать обобщенный вывод о том, что представленный материал охватывает комплекс вопросов, относящихся к разработке методов исследования деформационных процессов применительно к крупным инженерным сооружениям. В основу разработанного метода положены современные возможности определения осадок и смещений на основе применения топоцентрических прямоугольных координат с применением глобальных спутниковых навигационных систем. При этом в процессе реализации упомянутого комплекса решены следующие задачи:

1. Разработана методика обработки результатов спутниковых измерений с целью выявления деформаций крупных инженерных сооружений, используя топоцентрическую систему координат.
2. Точностные исследования разработанной методики обработки результатов спутниковых измерений показали, что средние квадратические ошибки деформационных характеристик наблюдаемых объектов зависят только от точности определения приращений координат и не зависят от точности определения абсолютных координат и от точности знания аномалий высот в районе выполненных работ.
3. Предложенный метод спутниковых измерений при мониторинге крупных инженерных сооружений позволит существенно сократить время поиска признаков деформаций в условиях Мексики.
4. Усовершенствован процесс проведения на геодезических сетях полевых спутниковых измерений и процедур последующей обработки результатов измерений с тем, чтобы на их основе получать надежные значения изучаемых деформаций.
5. Выявлены математические зависимости изменения точности топоцентрических декартовых координат при анализе деформаций крупных инженерных сооружений.
6. Предположенный метод изучения деформаций не выявлен на изучаемом объекте признаков смещений и осадок.

Новые принципы установления и дальнейшего развития системы топоцентрических прямоугольных координат при изучении деформационных процессов электроэнергетических объектов в Мексике на основе современных спутниковых технологий обуславливают необходимость изменения структуры геодезического обеспечения.

Результаты экспериментальных производственных работ, подтверждают высокую эффективность применения GPS-методов при изучении деформаций крупных инженерных сооружений.

Публикации по теме диссертации

1. Трехо Сото Мануэль. Применение топоцентрических прямоугольных координат при изучении деформаций крупных инженерных сооружений спутниковыми методами. Известия ВУЗов, Геодезия и аэрофотосъёмка, N 5, 2006, с. 53-60.
2. Трехо Сото Мануэль. Оценка точности топоцентрических прямоугольных координат при изучении деформаций крупных инженерных сооружений спутниковыми методами. Известия ВУЗов, Геодезия и аэрофотосъёмка, N 6, 2006, с. 75-86.
3. Трехо Сото Мануэль. Математический анализ спутниковых геодезических сетей при изучении деформаций инженерных сооружений. Геодезия и аэрофотосъёмка, N 1, 2007, с. 67-75.
4. García López Ramón, Moraila Valenzuela Carlos, López Moreno Manuel, Vázquez Becerra Esteban, Balderrama Corral Rigoberto, Plata Rocha Wenseslao y Trejo Soto Manuel. *Solución del Campo de Gravedad Empleando Datos Combinados de las misiones GRACE y CHAMP usando el principio de Conservación de la energía*. Reunion Annual de la Union Geofisica Mexicana. (29Oct-3Nov, 2006). <http://www.ugm.org.mx>.