

На правах рукописи

**НГУЕН ВЬЕТ ХА**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛОТИН  
ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПУТНИКОВЫХ  
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ВО ВЬЕТНАМЕ**

**Специальность: 25.00.32 – Геодезия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Москва 2010**

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Клюшин Е.Б.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Пимшин Ю.И.

кандидат технических наук  
Власенко Е.П.

Ведущая организация: Грозненский Государственный нефтяной институт  
им. Академика М.Д. Миллионщикова.

Защита диссертации состоится « 17 » февраля 2011 г. в 12 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, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК.

Автореферат разослан «        » декабря 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Климков Ю.М.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

В последние годы во Вьетнаме было модернизировано и построено множество крупных современных индустриальных сооружений страны, таких как гидроэлектростанции Хоа Бинь, ЧиАнь, ТуэнКуанг, ШонгХинь, Иали, Сесан, СонЛа. Крепежные и опорные элементы гидротехнических сооружений (гидроэлектростанции, водонапорные плотины, водосливные плотины, трубопроводы) конструктивно находятся в слабых местах, и часто давление воды действует с одной стороны этих сооружений. Под воздействием давления воды и других природных факторов, а также вследствие нестабильной основы сооружений агрегаты и отдельные элементы могут быть деформированы, а при деформациях, превышающих допустимые пределы, могут происходить повреждения и даже разрушения конструкций. Поэтому мониторинг и наблюдения за деформациями гидротехнических сооружений являются чрезвычайно важными. Результаты наблюдений за деформациями для оценки стабильности и безопасности сооружений помогают специалистам сделать процесс строительства и реконструкции гидротехнических сооружений более надежным и безопасным.

Наблюдения за деформациями плотин и водоспусков являются сложной и проблемной задачей, требующей высокой точности, поэтому в этой области разработаны различные методы измерений и анализа результатов. Основным в настоящее время становится спутниковый метод, имеющий ряд преимуществ, так как является наиболее точным, быстрым и самым удобным способом определения координат точек.

### **Цель диссертационной работы**

Основной целью работы является разработка методики анализа результатов наблюдений за осадками и смещениями плотин во Вьетнаме с применением спутниковых методов измерений, а также научное обоснование методики и определение путей ее практической реализации.

## **Основные задачи исследования**

Для решения задач эффективного применения современных спутниковых технологий прогнозирования деформаций плотин гидроэлектростанций исследован следующий круг задач:

- анализ стабильности пунктов опорной сети по результатам измерений традиционными способами;
- анализ стабильности пунктов опорной сети по результатам измерений спутниковым методом;
- разработана методика определения величин деформаций плотин гидроэлектростанций в локальной системе координат;
- преобразование координат, полученных из системы координат WGS-84 в локальную систему координат;
- составление программы уравнивания спутниковой геодезической сети;
- составлены программы свободного уравнивания спутниковой геодезической сети и анализа стабильности опорной сети;
- разработана программа преобразования результатов спутниковых наблюдений в локальную систему координат.

## **Научная новизна работы**

1. Выполнен анализ стабильности пунктов опорной сети при наблюдениях спутниковыми методами за деформациями гидротехнических сооружений во Вьетнаме.

2. Разработан алгоритм преобразования координат из системы координат WGS-84 в локальную систему, а также алгоритм определения средних квадратических ошибок координат в локальной системе координат, и установлена зависимость между малыми изменениями декартовых координат  $x$ ,  $y$  и  $H$  и геоцентрических координат.

3. Разработаны следующие программы: уравнивание спутниковой геодезической сети; свободное уравнивание спутниковой геодезической сети и ана-

лиз стабильности опорной сети; преобразование координат из системы координат WGS-84 в локальную систему координат.

4. Выполнена оценка точности определения величин деформаций сооружений по результатам спутниковых наблюдений.

### **Публикации и апробация работы**

По результатам выполненных исследований по теме диссертации опубликованы две статьи в журналах, рекомендованных ВАК России, а также (в соавторстве) тезисы докладов на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК (Москва, апрель 2008, апрель 2009, апрель 2010).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов с подразделами, заключения и списка литературы. Общий объем работы – 122 стр. Диссертация содержит 24 таблицы и 27 рисунков. Список литературы составляет 53 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

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

### **ГЛАВА 1. ДЕФОРМАЦИИ ПЛОТИН ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ**

В главе дается общая характеристика гидроэлектростанций Социалистической Республики Вьетнам (СРВ), а также потребности и перспективы развития энергоснабжения Вьетнама. Территория СРВ составляет 329,6 тыс. км<sup>2</sup>. На севере и юге Вьетнама расположены два главных района, выращивающие рис, образованные дельтами рек Хонгха (Красная) и Меконг (Кыулонг). Длина реки Хонгха в пределах Вьетнама – 508 км, реки Меконг – 250 км. Другие крупные

реки страны: Да (Черная), Ло, Ма, Тхайбинь, Ка, Донгнай, Ба. Крупнейшие озера страны: на юге – Дарлак (1 тыс. га), на севере – Бабе (500 га), Западное (466 га). Ежегодно речная сеть востока Вьетнама несет в море 870 бил. м<sup>3</sup>/год воды; соответствующий средний поток составляет 37500 м<sup>3</sup>/сек.

Рассмотрены различные типы гидроэлектростанций (ГЭС) и отмечено, что плотины являются необходимым звеном в их строительстве, связанном с ростом и развитием народного хозяйства страны. В связи с этим геодезические работы находят широкое применение при строительстве и эксплуатации ГЭС.

Основными методами при измерении осадков и деформаций инженерных сооружений являются геодезические. Они позволяют определять не только относительные перемещения точек, но также их абсолютные величины по отношению к практически неподвижным знакам геодезического обоснования.

Наблюдения за осадками и деформациями сооружений занимают значительное место в современной практике инженерно-геодезических работ. При этом объем и сложность наблюдений, а также требования к их точности из года в год возрастают. В связи с этим разрабатываются специальные методы и средства измерений. Выбор методики и способа геодезических наблюдений определяют исходя из конструктивных особенностей сооружений и специфики условий. Для наблюдений за осадками и деформациями крупных инженерных сооружений применяют самые специфические методы.

При изучении различного рода деформаций, возникающих в земной коре, а также в основаниях гидроэлектростанций 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 плотин гидроэлектростанций. При этом необходимо учитывать, что нормальная высота пунктов определятся менее точно. 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.

Установлено, что основные пространственно-временные характеристики аномальных движений идентичны как для сейсмоактивных, так и для асейсмичных разломных зон. При этом интенсивность деформационного процесса в разломах асейсмичных регионов выше, чем в сейсмоактивных. По мнению Ю.О. Кузьмина, явление суперинтенсивных деформаций платформенных, асейсмичных разломов следует отнести к новому классу тектонических движений. В целом же фактор современной геодинамической активности геологической среды не учитывался при анализе аварийных ситуаций инженерных сооружений. В последние годы были получены принципиально новые данные о современном геодинамическом состоянии поверхности Земли. Оказалось, что имеют место современные суперинтенсивные деформации земной поверхности со скоростями до 50-70 мм в год, которые приурочены к зонам тектонических нарушений (разломам различного типа и порядка).

Выявлено наличие интенсивных локальных аномалий вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности. Эти аномальные движения высокоградиентны (свыше 50 мм/год), короткопериодичны (от 0,1 года до первых лет), пространственно локализованы (от 0,1 км до первых десятков километров), обладают пульсационной и знакопеременной направленностью.

Настоящая работа посвящена разработке рациональной и экономически целесообразной методики построения спутниковой сети для изучения деформаций и осадок гидротехнических сооружений с учетом особенностей развития гидроэлектростанции Туен Куанг, которая выбрана в качестве примера для исследований.

## **ГЛАВА 2. СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТАХ**

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.

Рассмотрены основные источники ошибок спутниковых наблюдений и поправки, вводимые в результаты измерений.

Основное внимание в данной главе уделено подходу к решениям, ориентированным на минимизацию влияния основных источников ошибок спутниковых измерений при исследованиях деформаций земной поверхности.

## **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСАДОК И СМЕЩЕНИЙ ПЛОТИН ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

В главе даются основные рекомендации по наблюдениям за осадками и деформациями плотин гидроэлектростанций, 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 широкое применение для изучения и мониторинга деформаций инженерных сооружений.

В настоящее время в связи с интенсивным развитием спутниковых технологий и активизацией деятельности по функционированию спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС создаются предпосылки к расширению областей их применения. Реализация концепции устойчивого развития общества требует большего внимания к обеспечению безопасности жизнедеятельности и функционирования инженерных объектов. Перед геодезистами



возникает задача разработки и совершенствования методов и средств деформационного анализа на основе современных спутниковых технологий.

В настоящее время для наблюдения за деформациями гидротехнических сооружений спутниковыми методами применяются построения из специальных локальных геодезических сетей, состоящих из двух-трех ступеней. При этом первая ступень является опорной сетью, включающей в себя нескольких пунктов, располагающихся на устойчивых местах. В каждом цикле наблюдений производятся необходимые измерения элементов этой сети с целью проверки стабильности и определения координат ее пунктов. В целом, задача обработки результатов измерений в опорной сети в наблюдаемом цикле заключается в следующем:

в сети, состоящей из  $m$  пунктов, измеряются все базовые линии  $n$ ;

где

- $(X_i, Y_i, Z_i)$  - координаты точки  $i$  после уравнивания сети;
- $(X_i^{(0)}, Y_i^{(0)}, Z_i^{(0)})$  - координаты точки  $i$  по результатам спутниковых измерений;
- $(dx_i, dy_i, dz_i)$  - поправки к координатам точки  $i$  при уравнивании сети;
- $(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij})$  - приращения координат точек  $i$  и  $j$  после уравнивание сети;
- $(\Delta x'_{ij}, \Delta y'_{ij}, \Delta z'_{ij})$  - приращения координат точек  $i$  и  $j$  по результатам спутниковых измерений;
- $(v_{x_{ij}}, v_{y_{ij}}, v_{z_{ij}})$  - поправки в измеренные приращение координаты точек  $i$  и  $j$ .

В первом цикле определяются приращения координат точек  $i$  и  $j$

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_{ij}^{(1)} &= X_j^{(1)} - X_i^{(1)} \\ \Delta Y_{ij}^{(1)} &= Y_j^{(1)} - Y_i^{(1)} \\ \Delta Z_{ij}^{(1)} &= Z_j^{(1)} - Z_i^{(1)} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Из (1) можно составить следующие параметрические уравнения поправок:

$$\left. \begin{aligned} v_{x_{ij}}^1 &= -dx_i + dx_j + l_{x_{ij}}^1 \\ v_{y_{ij}}^1 &= -dy_i + dy_j + l_{y_{ij}}^1 \\ v_{z_{ij}}^1 &= -dz_i + dz_j + l_{z_{ij}}^1 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} l_{x_{ij}}^1 &= X_j^0 - X_i^0 - \Delta X_{ij}^{(1)} \\ l_{y_{ij}}^1 &= Y_j^0 - Y_i^0 - \Delta Y_{ij}^{(1)} \\ l_{z_{ij}}^1 &= Z_j^0 - Z_i^0 - \Delta Z_{ij}^{(1)} \end{aligned} \right\}; \text{ - свободные члены}; \quad (3)$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} \dots & -1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}_{3 \times 3m};$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{bmatrix}_{3n \times 3m},$$

где  $A$  – матрица коэффициентов.

Далее определяются величины:

$$L_{ij} = \begin{bmatrix} l_{x_{ij}} \\ l_{y_{ij}} \\ l_{z_{ij}} \end{bmatrix}_{3 \times 1}; \quad L = \begin{bmatrix} L_1 \\ \dots \\ L_n \end{bmatrix}_{3n \times 1};$$

где  $L$  – матрица-столбец свободных членов;

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} v_{x_{ij}} \\ v_{y_{ij}} \\ v_{z_{ij}} \end{bmatrix}_{3 \times 1}; \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix}_{3n \times 1},$$

где  $V$  – матрица-столбец поправок;

$$\delta X^T = [\dots \quad dx_i \quad dy_i \quad dz_i \quad \dots],$$

где  $\delta X$  – матрица-столбец неизвестных.

В матричной форме систему поправок можно записать следующим образом:

$$V = A \delta X + L. \quad (4)$$

В матричной форме система нормальных уравнений принимает вид:

$$(A^T P A) \delta X + (A^T P L) = 0, \quad (5)$$

где  $P = K^{-1}$ ;  $K$  - ковариационная матрица,  $P$  - матрица весов.

Или

$$R \delta X + b = 0. \quad (6)$$

Неизвестные величины находятся следующим образом:

$$X = -R^{-1} b = -Q b. \quad (7)$$

Ошибка единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T P V}{3(n-m)}}, \quad (8)$$

где  $\mu$  – средняя квадратическая ошибка единицы веса.

Получив решение (8), оценка точности векторов пространственных смещений выполняется по формуле

$$\left. \begin{aligned} m_{x_i} &= \mu \sqrt{Q_{xx_i}} \\ m_{y_i} &= \mu \sqrt{Q_{yy_i}} \\ m_{z_i} &= \mu \sqrt{Q_{zz_i}} \end{aligned} \right\}.$$

Пусть имеется вектор уравненных координат пространственной сети в первом цикле наблюдений  $X_1 = (x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots, x_k, y_k, z_k)^T$  и вектор измеренных элементов той же сети в исследуемом цикле. Необходимо произвести уравнение и фиксацию этой сети по координатам пунктов сети из первого цикла.

Для решения этой задачи можно считать опорную сеть в исследуемом цикле как свободную и применять метод свободного уравнивания для обработки результатов измерений элементов сети. При этом объединение сети в двух циклах (исследуемом и первом) предполагается выполнять под условием минимума суммы квадратов расхождений в одноименных координатах устойчивых пунктов сети.

Как известно, уравнивание свободной сети в исследуемом цикле приводит к системе нормальных уравнений (6).

Если при уравнивании за приближенные координаты принимаются уравненные координаты сети из первого цикла, то получается, что вектор неизвестных в системе уравнений (8) есть вектор расхождений одноименных координат в двух циклах наблюдений, то же самое и является вектором смещений пунктов опорной сети.

Для объединения результатов измерений исследуемого цикла необходимо поставить дополнительные условия для неизвестных:

$$C^T \delta X = 0. \quad (9)$$

Условие минимума суммы квадратов расхождений в одноименных координатах устойчивых пунктов сети приводит к следующим правилам выбора матрицы  $C$ :

$$\left. \begin{array}{l} C_i = B_i \quad \text{для стабильного пункта} \\ C_i = 0 \quad \text{для нестабильного пункта} \end{array} \right\}, \quad (10)$$

где  $B_i$  есть матрица преобразования координат Гельмерта для пункта  $i$ ; в общем случае для плановой сети эта матрица имеет вид:

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i & y_i & x_i \\ 0 & 1 & 0 & -z_i & 0 & -x_i & y_i \\ 0 & 0 & 1 & -y_i & -x_i & 0 & z_i \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для линейно-угловой сети в матрице  $B_i$  отсутствует четвертый столбец, а для спутниковой сети существуют только три первые столбца.

Совместное решение системы нормальных уравнений (8) при дополнительных условиях (9) дает результат:

$$\delta X = -R^{-1}b, \quad (12)$$

где  $R^{-1}$  – псевдообратная матрица от  $R$ , полученная, например, по формуле:

$$R^{-1} = (R + CC^T)^{-1} - B(C^T B)^{-1}(B(C^T B)^{-1})^T. \quad (13)$$

Критерий для определения стабильности пунктов выбирается, исходя из правила трех сигм, выраженного так: *«Пункт считается стабильным, если значение его смещения не превосходит предельную ошибку определения самого этого же смещения»*. Это правило реализуется выражением:

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &\leq tm_{Q_x} \\ \delta_y &\leq tm_{Q_y} \\ \delta_z &\leq tm_{Q_z} \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

В формуле (14) ошибки определения смещений по осям координат  $m_{Q_x}$ ,  $m_{Q_y}$  и  $m_{Q_z}$  можно определить через ошибки уравненных координат (в двух циклах наблюдений, которые сравниваются) по формуле:

$$\left. \begin{aligned} m_{Q_x} &= \sqrt{m_{x_1}^2 + m_{x_2}^2} \\ m_{Q_y} &= \sqrt{m_{y_1}^2 + m_{y_2}^2} \\ m_{Q_z} &= \sqrt{m_{z_1}^2 + m_{z_2}^2} \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Обычно полученные из уравнивания ошибки  $m_{Q_x}$ ,  $m_{Q_y}$  и  $m_{Q_z}$  не будут одинаковы для пунктов сети, поэтому вместо критерия (14) можно выбрать одно какое-то общее значение (например, из проектных данных)  $\Delta Q_{np}$  для всех пунктов сети, тогда критерий для оценки стабильности будет иметь вид:

$$Q_{x(y,z)} \leq \Delta Q_{np}. \quad (16)$$

Таким образом, имеется правило (10) для выбора матрицы  $C$  и критерий (16) для оценки стабильности пунктов опорной сети. Комбинируя эти выражения, можно решать задачи уравнивания опорной сети и наличие стабильных пунктов в исследуемом цикле наблюдений. Однако при применении формул (10) и (16) в практических вычислениях возникают трудности в одновременности реализации этих выражений.

Для обработки результатов измерений рекомендовано применение специальной программы ВЪЧ-ИНЖ2010 (программа написана автором диссертации). При обработке геодезических измерений с помощью ВЪЧ-ИНЖ2010 имеется возможность выбрать тот или иной способ вычисления, автоматически контролировать точность производимых расчетов, а также выполнять визуальный анализ корректности полученных результатов. Рассмотрим основные модули данной программы.

Модуль «Уравнивание линейно-угловых геодезических сетей» выполняет уравнивание плановых геодезических сетей (рис. 1).

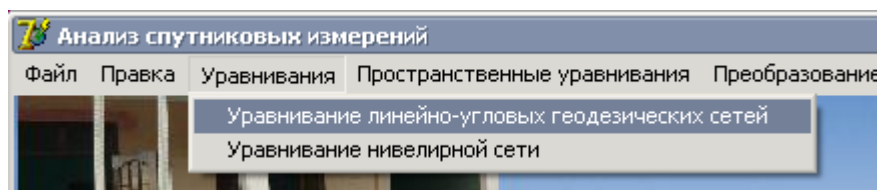


Рисунок 1

Модуль «Уравнивание нивелирной сети» (рис. 2) выполняет уравнивание высотных геодезических сетей.

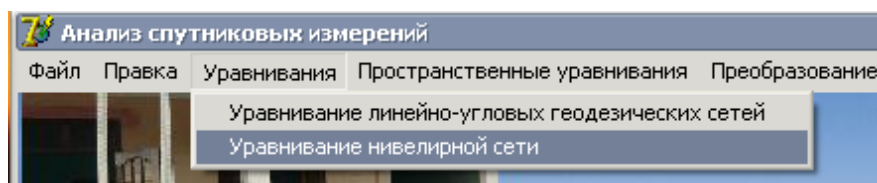


Рисунок 2

Модуль «Зависимое уравнивание» (рис. 3) выполняет уравнивание пространственных зависимых сетей по результатам спутниковых геодезических измерений.

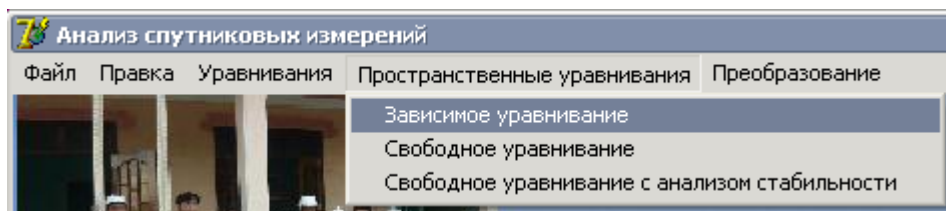


Рисунок 3

Модуль «Свободное уравнивание» (рис. 4) выполняет уравнивание пространственных свободных сетей по результатам спутниковых геодезических измерений. В каждом цикле наблюдений производятся необходимые измерения элементов сети с целью проверки стабильности и определения координат ее пунктов.

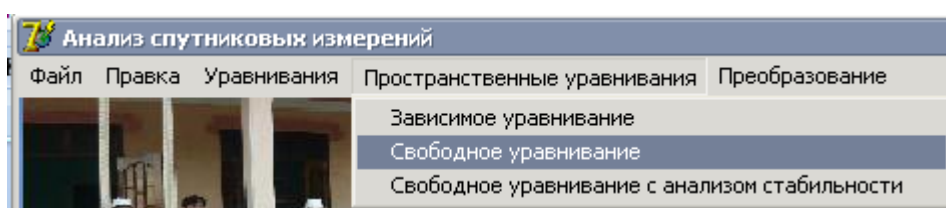


Рисунок 4

Модуль «Свободное уравнивание с анализом стабильности» (рис. 5) позволяет выполнить уравнивание пространственных свободных сетей с анализом стабильности по результатам спутниковых геодезических измерений.

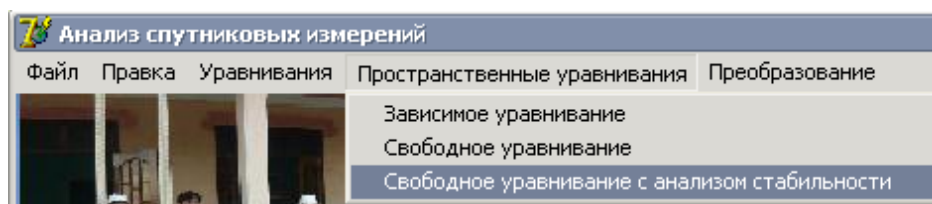


Рисунок 5

Модуль «Перевычисление  $BLH \rightarrow XYZ$ » (рис. 6) предназначен для преобразования из геодезических координат в геоцентрические координаты.

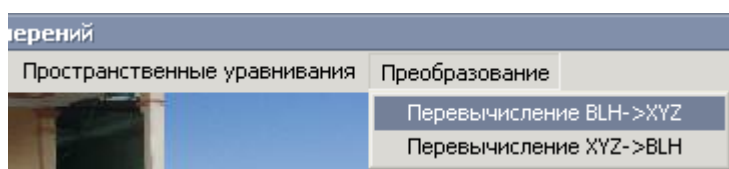


Рисунок 6

Модуль «Перевычисление  $XYZ \rightarrow BLH$ » (рис. 7) предназначен для преобразования геоцентрических координат в геодезические координаты.

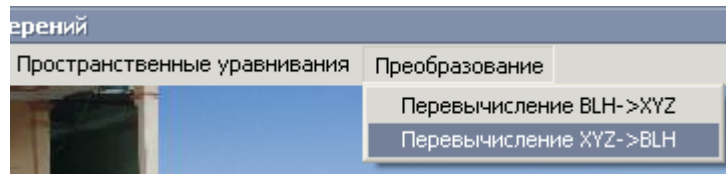


Рисунок 7

При наблюдениях за деформациями сооружений необходимо выделить осадки и горизонтальные смещения. Геодезические декартовы системы координат, используемые в навигационных спутниковых системах без преобразования, не позволяют выделить осадки наблюдаемого объекта и горизонтальные перемещения. Для этих целей полезно использовать плоские конформные координаты в проекции Гаусса, так как они имеют строгую математическую связь с криволинейными геодезическими координатами, а через них и с прямоугольными геодезическими системами координат. Воспользуемся известными зависимостями для оценки точности вычисления деформаций сооружений по результатам спутниковых наблюдений.

Формулы для определения конформных плоских координат  $x$ ,  $y$  и  $H$  в проекции Гаусса по геодезическим координатам  $B$  и  $L$ :

$$x = D + \frac{N}{2\rho^2} l''^2 \sin B \cos B; \quad (17)$$

$$y = \frac{l''}{\rho} N \cos B; \quad (18)$$

$$H = \frac{R}{\cos B} - N, \quad (19)$$

где

$$D = a(1 - e^2) \left( A_d \frac{B''}{\rho} - \frac{B_d}{2} \sin 2B + \frac{C_d}{4} \sin 4B - \dots \right); \quad - \text{длина дуги меридиана.} \quad (20)$$

$$A_d = 1 + \frac{3}{4} e^2 + \frac{45}{64} e^4 + \dots;$$

$$B_d = \frac{3}{4} e^2 + \frac{15}{16} e^4 + \dots;$$



$$C_d = \frac{15}{64}e^4 + \dots;$$

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

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

$H$ - геодезическая высота

Для оценки точности выполним дифференцирование формул (17-19), получаем:

$$dx = dD + \frac{N}{2\rho^2} \sin 2B l dl - \frac{N}{4\rho} l^2 \sin 2B \frac{dB}{\rho} + \frac{l^2}{4\rho^2} \sin 2B dN; \quad (21)$$

$$dy = N \cos B \frac{dl}{\rho} - \frac{lN}{\rho} \sin B \frac{dB}{\rho} + \frac{l}{\rho} \cos B dN; \quad (22)$$

$$dH = \frac{1}{\cos B} dR - \frac{R \sin B}{\cos^2 B} dB - dN. \quad (23)$$

Для нахождения зависимости дифференциала широты от изменений декартовых геоцентрических координат дифференцируем формулу Боуринга:

$$\operatorname{tg} B = \frac{z}{R} \cdot \frac{r^3 + be^{i2} z^2}{r^3 - be^2(1 - e^2)R^2}, \quad (24)$$

где:  $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2};$

$$e^{i2} = \frac{e^2}{1 - e^2};$$

$$r = \sqrt{z^2 + (x^2 + y^2)(1 - e^2)};$$

$$b = a\sqrt{1 - e^2}.$$

Дифференцируя уравнение (24), получим

$$d(\operatorname{tg} B) = \frac{dB}{\rho \cos^2 B} = d\left(\frac{Z}{R}\right) \cdot \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{r^3 - be^2(1 - e^2)R^2} + \frac{Z}{R} \cdot d\left(\frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{r^3 - be^2(1 - e^2)R^2}\right);$$

$$\begin{aligned}
\frac{dB}{\rho} = & \left[ \left[ -\frac{Z}{R^3} \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + F(x) \right] \cos B^2 X dX + \\
& + \left[ \left[ -\frac{Z}{R^3} \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + F(y) \right] \cos B^2 Y dY + \\
& + \left[ \left[ \frac{1}{RZ} \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + F(z) \right] \cos B^2 Z dZ,
\end{aligned} \tag{25}$$

где:

$$\begin{aligned}
F(x) = & \left[ \left( \frac{Z}{R} \right) \frac{3r(1-e^2)}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] - \\
& - \left[ \left( \frac{Z}{R} \right) \left( \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{(r^3 - be^2(1-e^2)R^2)^2} \right) \left[ 3r(1-e^2) - 2be^2(1-e^2) \right] \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F(y) = & \left[ \left( \frac{Z}{R} \right) \frac{3r(1-e^2)}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] - \\
& - \left[ \left( \frac{Z}{R} \right) \left( \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{(r^3 - be^2(1-e^2)R^2)^2} \right) \left[ 3r(1-e^2) - 2be^2(1-e^2) \right] \right];
\end{aligned}$$

$$F(z) = \left[ \left( \frac{Z}{R} \right) \frac{3r(1-e^2)}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] - \left[ \left( \frac{Z}{R} \right) \left( \frac{r^3 + be^{i2} Z_1^2}{(r^3 - be^2(1-e^2)R^2)^2} \right) 3r \right].$$

Введем обозначения:

$$A = X \left[ \left[ -\frac{Z}{R^3} \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + F(x) \right] \cos^2 B; \tag{26}$$

$$B = Y \left[ \left[ -\frac{Z}{R^3} \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + F(y) \right] \cos^2 B; \tag{27}$$

$$C = Z \left[ \left[ \frac{1}{RZ} \frac{r^3 + be^{i2} Z^2}{r^3 - be^2(1-e^2)R^2} \right] + F(z) \right] \cos^2 B. \tag{28}$$

С учетом принятых обозначений формула (25) примет вид:

$$\frac{dB}{\rho} = AdX + BdY + CdZ. \quad (29)$$

Дифференцируя уравнение (20), получим

$$dD = a(1 - e^2) \left( A_d - B_d \cos 2B + C_d \cos 4B \frac{dB}{\rho} \right). \quad (30)$$

С учетом (29) выражение (30) примет вид:

$$dD = a(1 - e^2)(A_d - B_d \cos 2B + C_d \cos 4B)(AdX + BdY + CdZ). \quad (31)$$

Переходя от дифференциалов к средним квадратическим ошибкам, получим:

$$m_D^2 = a^2(1 - e^2)^2(A_d - B_d \cos 2B + C_d \cos 4B)^2(A^2m_x^2 + B^2m_y^2 + C^2m_z^2). \quad (32)$$

Для определения зависимости дифференциала долготы  $dl$  от дифференциалов декартовых координат дифференцируем  $\operatorname{tg}L$ :

$$\operatorname{tg}L = \frac{Y}{X}.$$

$$dl = \frac{\cos^2 L}{X} dY - \frac{Y \cos^2 L}{X^2} dX. \quad (33)$$

Дифференциал абсциссы в проекции Гаусса  $dx$  определим из формулы (21) с учетом  $dD$  (31),  $d\beta$  (29) преобразуем к виду:

$$dx = \left[ a(1 - e^2)(A_d - B_d \cos 2B + C_d \cos 4B) - \frac{N}{4\rho} l^2 \sin 2B + \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \frac{l}{\rho} \cos B \right] (AdX + BdY + CdZ) + \frac{Nl}{2\rho} \sin 2B \left( \frac{\cos^2 l}{X} dY - \frac{Y \cos^2 l}{X^2} dX \right). \quad (34)$$

Введем обозначения:

$$A_x = A \left[ a(1 - e^2)(A_d - B_d \cos 2B + C_d \cos 4B) - \frac{N}{2\rho} l^2 \sin 2B + \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \frac{l}{\rho} \cos B \right] - \frac{Nl}{2\rho} \sin 2B \frac{Y \cos^2 l}{X^2}; \quad (35)$$

$$B_x = B \left[ a(1-e^2)(A_d - B_d \cos 2B + C_d \cos 4B) - \frac{N}{2\rho} l^2 \sin 2B + \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1-e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \frac{l}{\rho} \cos B \right] + \frac{Nl}{2\rho} \sin 2B \frac{Y \cos^2 l}{X}; \quad (36)$$

$$C_x = C \left[ a(1-e^2)(A_d - B_d \cos 2B + C_d \cos 4B) - \frac{N}{4\rho} l^2 \sin 2B + \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1-e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \frac{l}{\rho} \cos B \right]. \quad (37)$$

С использованием принятых обозначений (35-37) формула (34) может быть записана в виде:

$$dx = A_x dX + B_x dY + C_x dZ. \quad (38)$$

Из формулы (38) переходим к средним квадратическим ошибкам:

$$m_x^2 = A_x^2 m_X^2 + B_x^2 m_Y^2 + C_x^2 m_Z^2. \quad (39)$$

Формулу (22) с учетом (29, 33) можно привести к виду:

$$dy = N \cos B \left( \frac{\cos^2 L}{X} dY - \frac{Y \cos^2 L}{X^2} dX \right) + \left( \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1-e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \frac{l}{\rho} \cos B - \frac{lN}{\rho} \sin B \right) (AdX + BdY + CdZ). \quad (40)$$

Примем обозначения:

$$A_y = A \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1-e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \frac{l}{\rho} \cos B - A \frac{lN}{\rho} \sin B - N \cos B \frac{Y \cos^2 L}{X^2}; \quad (41)$$

$$B_y = B \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1-e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \frac{l}{\rho} \cos B - B \frac{lN}{\rho} \sin B + N \cos B \frac{\cos^2 L}{X}; \quad (42)$$

$$C_y = C \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1-e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \frac{l}{\rho} \cos B - C \frac{lN}{\rho} \sin B. \quad (43)$$

С учетом обозначений формулу (40) представим в виде:

$$dy = A_y dX + B_y dY + C_y dZ. \quad (44)$$

Переходя к средним квадратическим ошибкам, получим:

$$m_y^2 = A_y^2 m_X^2 + B_y^2 m_Y^2 + C_y^2 m_Z^2. \quad (45)$$

Формулу (23) с учетом (29) можно привести к виду:

$$dH = \frac{X}{R \cos B} dX + \frac{Y}{R \cos B} dY - \left[ \frac{R \sin B}{\cos^2 B} + \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \right] (AdX + BdY + CdZ). \quad (46)$$

Примем обозначения:

$$A_H = \frac{X}{R \cos B} - \left[ \frac{R \sin B}{\cos^2 B} + \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \right] A;$$

$$B_H = \frac{Y}{R \cos B} - \left[ \frac{R \sin B}{\cos^2 B} + \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \right] B;$$

$$C_H = \left[ \frac{R \sin B}{\cos^2 B} + \frac{ae^2 \sin 2B}{2(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}} \right] C.$$

С учетом обозначений формулу (46) представим в виде:

$$dH = A_H dX + B_H dY + C_H dZ. \quad (47)$$

Из формулы (47) переходим к средним квадратическим ошибкам

$$m_H^2 = A_H^2 m_X^2 + B_H^2 m_Y^2 + C_H^2 m_Z^2. \quad (48)$$

Формулы средних квадратических ошибок

$$\left. \begin{aligned} m_x^2 &= A_x^2 m_X^2 + B_x^2 m_Y^2 + C_x^2 m_Z^2 \\ m_y^2 &= A_y^2 m_X^2 + B_y^2 m_Y^2 + C_y^2 m_Z^2 \\ m_H^2 &= A_H^2 m_X^2 + B_H^2 m_Y^2 + C_H^2 m_Z^2 \end{aligned} \right\}.$$

Для иллюстрации возьмем пример процесса обработки результатов измерений и оценки точности вычисления деформаций плотины «Наханг» (Вьетнам) по результатам спутниковых наблюдений (рис. 8).

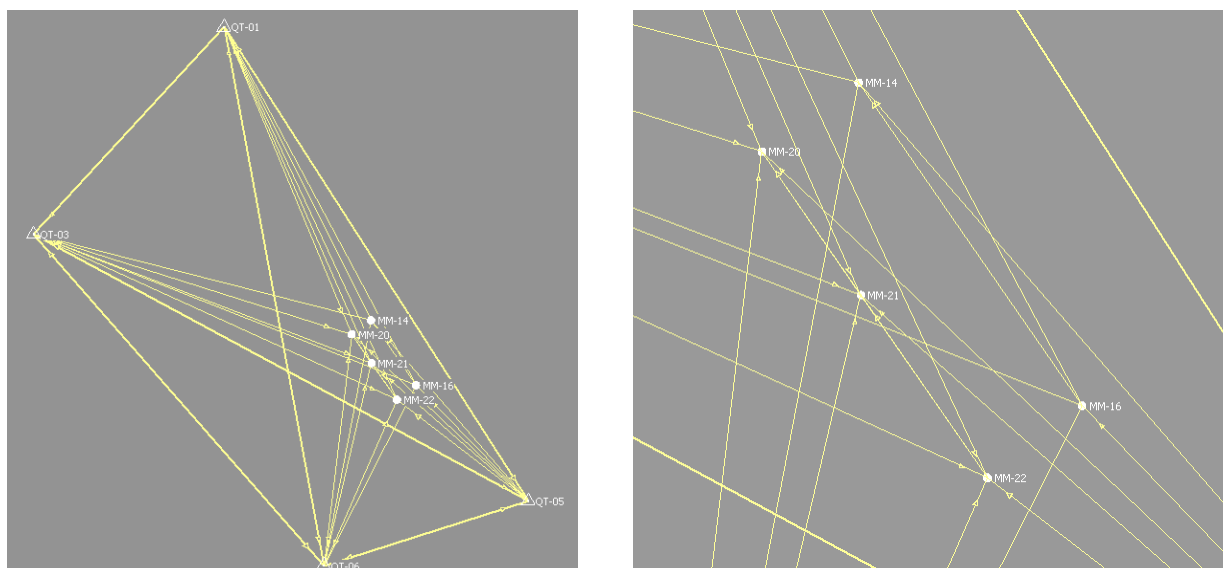


Рисунок 8. Схема размещения геодезических пунктов для наблюдений за осадками и смещениями плотины «Наханг» Вьетнама

В сети были измерены 3 сеанса шестью приемниками Trimble R3 со средними квадратичными ошибками  $m_s=(5+1 \cdot Dppm)$  мм. Уравненные координаты сети и средние квадратические ошибки пространственных прямоугольных приращений координат  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  рабочих пунктов приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Пункты        | $\Delta X$ , м | $m_{\Delta X}$ , м | $\Delta Y$ , м | $m_{\Delta Y}$ , м | $\Delta Z$ , м | $m_{\Delta Z}$ , м |
|---------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| ММ-14 - QT-01 | 363,517        | 0,002              | -122,604       | 0,002              | 593,646        | 0,005              |
| ММ-16 - QT-01 | 471,803        | 0,002              | -148,495       | 0,002              | 724,210        | 0,005              |
| ММ-20 - QT-01 | 319,021        | 0,002              | -119,850       | 0,002              | 632,213        | 0,004              |
| ММ-21 - QT-01 | 367,012        | 0,002              | -131,388       | 0,002              | 690,234        | 0,005              |
| ММ-22 - QT-01 | 428,289        | 0,002              | -146,005       | 0,002              | 764,079        | 0,004              |

После преобразования плоские конформные координаты в проекции Гаусса и их оценка точности приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Пункты | $\Delta x$ , м | $m_{\Delta x}$ , м | $\Delta y$ , м | $m_{\Delta y}$ , м | $H$ , м | $M_H$ , м |
|--------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|---------|-----------|
| ММ-14  | 630,550        | 0,004              | -318,177       | 0,002              | 68,277  | 0,002     |
| ММ-16  | 771,690        | 0,004              | -415,765       | 0,002              | 68,286  | 0,002     |
| ММ-20  | 660,732        | 0,004              | -276,027       | 0,002              | 40,224  | 0,002     |
| ММ-21  | 723,452        | 0,004              | -319,259       | 0,002              | 40,224  | 0,002     |
| ММ-22  | 803,269        | 0,004              | -374,489       | 0,002              | 40,213  | 0,002     |

Формулы (39, 45, 48) можно использовать при оценке точности вычисления деформаций сооружений по результатам спутниковых измерений.

## **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 при использовании прямоугольных координат и применения глобальных спутниковых навигационных систем. При этом в процессе реализации упомянутого комплекса решены следующие задачи:

- разработана методика обработки результатов спутниковых измерений с целью выявления деформаций плотин гидроэлектростанций;
- разработана методика анализа стабильности пунктов опорной сети из измерений спутниковыми методами при наблюдениях за деформациями гидротехнических сооружений во Вьетнаме с использованием метода свободного уравнивания;
- выявлены математические зависимости изменения точности плоских конформных координат при анализе деформаций крупных инженерных сооружений;
- разработаны компьютерные программы для обработки результатов спутниковых измерений.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Чан Хань, Нгуен Вьет Ха. Анализ стабильности пунктов опорной сети при наблюдении за горизонтальными смещениями гидротехнических сооружений во Вьетнаме. Известия ВУЗов, Геодезия и аэрофотосъёмка, N 5, 2008, с. 33-38.
2. Нгуен Вьет Ха. Алгоритм настройки мониторинга сети деформированных туннелей и шахт. Двдцатая национальная конференция по вопросам горной науки и техники, Вунгтау, 2009.
3. Нгуен Вьет Ха. Оценка точности вычисления деформаций плотин гидроэлектростанций спутниковыми методами. Известия ВУЗов, Геодезия и аэрофотосъёмка, N 6, 2010.