Высокая точность системы ДФЭЦ дает возможность применять створные линии и пространственные сети ДФЭЦ в прецизионных сооружениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурачек, В.Г. Автоматизированная система точного геодезического контроля деформаций инженерных сооружений / В.Г. Бурачек, Т.Н. Малик, О.В. Лиховолов // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. – Хабаровск : ДВГУПС, 2015. – Вып. 3. – С. 86–98.
2. Оптико-електронний вузол : пат. України на винахід № 101052, МПК G01C 5/00 (2013.01) / В.Г. Бурачек, Т.М. Малік, А.О. Кравченко, Н.М. Ликова ; Коледж інформаційних технологій та землевпорядкування Національного авіаційного університету. – № a201103113; заявл. 17.03.2011; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. – 4 с. : іл.

THE CONCEPT OF AUTOMATED GEODETIC DEFORMATION MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES

V. BURACHEK, T. MALIK

The report focuses on solving urgent problems of raising the degree of automation of engineering and geodetic deformation monitoring of complex engineering structures during the operation. The concept allows us to solve complex problems: a through automated geodetic position control elements of all engineering structures with increased accuracy and efficiency, including monitoring of the engineering structure elements in limited or inaccessible for visual measurement locations; control of technogenic danger engineering structure in real-time.

Keywords*: the geodetic deformation monitoring, deformation of a construction, safety of the personnel, optical electronic devices.*

УДК 528.22.551.24 (075.8)

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ПАРАМЕТРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ

канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА,
д-р физ.-мат. наук В.Н. КОРОВКИН
(Полоцкий государственный университет, Беларусь)

Рассматривается проблема ошибок исходных данных при определении характеристик деформаций земной коры, определяемых на геодинамических полигонах по разностям уравненных координат между эпохами

PolotskSU

измерений. Показано, что эта проблема не снимается при переходе на спутниковые средства измерений.

***Ключевые слова**: современные движения земной коры, геодинамический полигон, повторные геодезические измерения*

Как известно, при определении характеристик горизонтальных деформаций земной коры по уравненным величинам на локальных геодинамических полигонах (ГДП) существует проблема ошибок исходных данных. Появление этих ошибок обусловлено природными, а не инструментальными причинами. Поэтому она существует независимо от того, наземными или спутниковыми методами мы выполняем геодезические измерения. Проблема влияния ошибок исходных данных на характеристики современных движений земной коры (СДЗК) детально исследовалась при обработке результатов наземных геодезических измерений на ГДП [1, 2, 5]. К характеристикам горизонтальных деформаций земной коры тогда же были отнесены:

1. Разности наклонных дальностей.
2. Векторы горизонтальных смещений.
3. Компоненты деформаций, определяемые в соответствии с теорией упругости.

Сейчас из всех названных характеристик акцент сделан на векторы горизонтальных смещений, которые максимально зависят от системы отсчета и ошибок исходных данных.

$$R_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}\ ; \tag{1}$$

$$\alpha_{R_i} = arctg\left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}\right) \pm 180^\circ , \tag{2}$$

где R_i – длина вектора смещений на *i*-том пункте сети;

$\Delta x_i, \Delta\gamma_i$ – разности уравненных координат между двумя сравниваемыми циклами измерений на *i*-м пункте сети;

α_{R_i} – дирекционный угол направления вектора смещений на *i*-м пункте сети.

Для уменьшения влияния ошибок исходных данных на векторы горизонтальных смещений при обработке плановых сетей на ГДП в [2] Даниловым предложено использовать Гельмертово преобразование, т.е. выполнить трансформирование координат 2-ой эпохи в соответствии с фор-

PolotskSU

мулами (3) и векторы смещений определить уже по разностям трансформированных координат (формулы (4–5)).

$$\begin{aligned} X_i &= a + K_1 x_i - K_2 y_i \\ Y_i &= b + K_1 y_i + K_2 x_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где x_i, y_i – координаты пунктов в новой системе;

X_i, Y_i – координаты пунктов в старой системе;

a, b, K_1, K_2 – неизвестные параметры трансформирования, из которых a, b – смещения начала новой системы координат относительно старой соответственно по осям *X, У*

$$K_1 = m\cos\alpha,\ K_2 = m\sin\alpha,$$

где m – изменение масштаба новой системы координат относительно старой;

α – угол поворота новой системы координат относительно старой.

$$R_i = \sqrt{\left(x_i^{'} - X_i\right)^2 + \left(y_i^{'} - Y_i\right)^2}; \quad (4)$$

$$\alpha_{R_i} = arctg\frac{\left(y_i^{'} - Y_i\right)}{\left(x_i^{'} - X_i\right)} \pm 180^{\circ}, \quad (5)$$

где x_i', y_i' – трансформированные координаты новой эпохи.

Точность трансформирования m_T или точность вставки сети новой эпохи в систему стабильных пунктов сети старой эпохи оценивается по формуле

$$m_r = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{r} R_i^2}{r}}, \quad (6)$$

где R_i – значения векторов смещений на стабильных пунктах, по координатам которых были определены параметры трансформирования.

Для определения 4-х параметров трансформирования достаточно 2-ух пунктов с известными координатами в две сравниваемые эпохи. Данилов составлял переопределенную систему линейных уравнений и определял параметры трансформирования по способу наименьших квадратов.

PolotskSU

Система стабильных пунктов у Данилова, по которым вычислялись параметры трансформирования, выбиралась по разностям измеренных величин между эпохами и по геолого-геофизическим данным. Однако на практике оказалось, что можно применить другой подход к выбору системы стабильных пунктов для определения параметров трансформирования, например, метод комбинаторики. Тогда для одной сети в результате получится несколько практически равноценных групп стабильных пунктов, приводящих к различным параметрам трансформирования и соответственно отличающимся векторным схемам. Далее, если мы на ГДП имеем 3 и более эпохи геодезических измерений, то при сравнении 1-ых двух эпох получим одну систему стабильных пунктов, а при сопоставлении последующих – уже другую систему стабильных пунктов. Это приведет в конечном итоге к несопоставимости полученных векторных схем.

Для исключения данной проблемы был выполнен анализ на возможность определения параметров трансформирования по всем пунктам сети, без деления их на стабильные и мобильные. Оказалось, что такой подход приводит к более достоверным результатам, чем подход определения параметров трансформирования по ограниченной совокупности пунктов сети.

Для уверенности в обоснованности такого простого подхода в каждом конкретном случае можно найти допустимый процент мобильных пунктов от общего числа всех пунктов в сети в зависимости от величин реальных смещений, при котором этими смещениями можно будет пренебречь, не теряя точности конечного результата, то есть точности определения параметров трансформирования.

Такой расчет рекомендуется произвести по формуле М.Д. Герасименко [6]

$$\frac{m}{n} \le 0{,}11 \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\left(\left(X_i^2 + Y_i^2\right) \cdot W_i^2\right)}{n}}{R^2 \frac{\sum_{i=1}^{m}\left(X_i^2 + Y_i^2\right)}{m}}, \qquad (7)$$

где m – число мобильных пунктов;

n – число всех пунктов в сети;

X, Y – координаты пунктов;

R – средняя величина реальных (вызванных тектоническими причинами) смещений на мобильных пунктах;

W – «смещения», вызванные ошибками исходных данных и случайными погрешностями измерений.

PolotskSU

Расчеты по формуле (7), выполненные для плановых сетей Камчатских ГДП, состоящих в среднем из 25 пунктов, показали, что ввиду малости величин реальных смещений на прогностических полигонах определение параметров трансформирования по всем пунктам сети является более надежным, чем нахождение этих параметров согласно методике Данилова, т.е. по ограниченной совокупности стабильных пунктов. Однако совершенно очевидно, что если повторные геодезические измерения на ГДП выполнены с целью регистрации последствий сильных землетрясений, то вычисление параметров трансформирования не может быть выполнено по всем пунктам сети, т.е. здесь подход Данилова становится определяющим.

Для уменьшения влияния ошибок исходных данных на векторы горизонтальных смещений, определяемых по разностям уравненных координат, используют также методику, основанную на теории уравнивания свободных геодезических сетей [1, 9–10], что, на наш взгляд, более эффективно, чем предыдущий метод. Под свободными геодезическими сетями здесь понимаются сети с недостаточным числом исходных данных для однозначного закрепления их в отсчетной системе (положение сети относительно начала системы координат, масштаб сети, ориентировка).

Согласно теории уравнивания свободных геодезических сетей решение системы нормальных уравнений

$$A^T PAX = A^T Pl, \tag{8}$$

где X – вектор неизвестных параметров (поправок к приближенным координатам);

A – матрица коэффициентов при неизвестных размером $n \times m$;

P – матрица весов;

l – вектор наблюдений,

находится под двумя условиями

$$V^T PV = min \quad X^T X = min. \tag{9}$$

И имеет вид

$$X = -N^+ L, \tag{10}$$

где N^+ – псевдообратная матрица,

$N^+ = (A^T PA)^+$.

При обработке плановых сетей на ГДП координатная система, относительно которой получают решение (10), задается центром сети, т.е. средним значением координат всей сети ($X_{ср.}$, $У_{ср.}$) для начальной эпохи.

Polotsksu

На практике плановые сети на ГДП часто уравнивают по разностям измеренных величин между сравниваемыми циклами. Для этого случая формулы (8–10) перепишутся в виде

$$N\delta x + L = 0, \tag{11}$$

где δx – вектор разностей координат двух эпох;
N – матрица коэффициентов нормальных уравнений;
L – матрица свободных членов.

$$\delta x = -N^{+}L \tag{12}$$

N^{+} может быть определена методом спектрального разложения. Решение (12) находится при двух условиях

$$V^{T}PV = \min \text{ и } \delta x^{T}\delta x = \min \tag{13}$$

где V – вектор поправок к результатам измерений;
P – весовая матрица измерений.

Для оценки точности применяется общеизвестная методика, основанная на использовании корреляционной матрицы уравненных разностей координат

$$K_{\delta x} = \mu_0^2 N^{+}, \tag{14}$$

где μ_0 – средняя квадратическая ошибка единицы веса, полученная из уравнивания.

Строго говоря, необходимость выполнения 2-ого из условий (13) накладывает некоторые ограничения на реальные смещения мобильных пунктов, что не совсем корректно. В строгом смысле матрица N^{+} должна определяться только по стабильным пунктам, а решение находиться относительно координатного центра стабильных пунктов. То есть здесь, как и при использовании метода трансформирования, встает вопрос выбора стабильных пунктов со всеми вытекающими отсюда проблемами неоднозначности определения векторов горизонтальных смещений. Очевидно, что и в этом случае формула (7) может оказаться полезной, и при соблюдении заложенного в ней требования решение достаточно получить по всем пунктам сети.

Современные геодезисты, выполняя геодезические измерения на ГДП спутниковыми методами, используют подход привязки пунктов локального ГДП к пунктам IGS (International GNSS Service) сети. По всей вероятности,

PolotskSU

они полагают, что выбрав отсчетную систему в виде далеких от исследуемой территории и надежных с точки зрения центров и измерительной информации IGS пунктов, им удастся уйти от проблемы ошибок исходных данных. С этой целью они делят пункты ГДП на долговременные и рядовые, и на долговременных пунктах выполняют существенно более длительные серии наблюдений. Такой подход осуществлен на ГДП «Белорусская АЭС», спутниковая сеть которого состоит из 17 пунктов и включает 4 долговременных. Долговременные пункты привязаны к пяти пунктам IGS сети (рисунок).

Результаты наблюдений на долговременных пунктах в обе сравниваемые эпохи уравнивают по программе обработки длиннобазисных спутниковых сетей, например, Bernese [8]. Координаты пунктов получают, соответственно, для каждой эпохи различные. Затем с полученными координатами как исходными выполняют уравнивание каждой эпохи по программному продукту к используемым спутниковым приемникам, например, Trimble business Centre, и вычисляют координаты оставшихся (рядовых) пунктов ГДП и, соответственно, векторы горизонтальных смещений, которые, как правило, получаются нереально большими. Трансформирование координат по параметрам трансформирования, найденным по координатам двух эпох на долговременных пунктах, практически не улучшает результат.

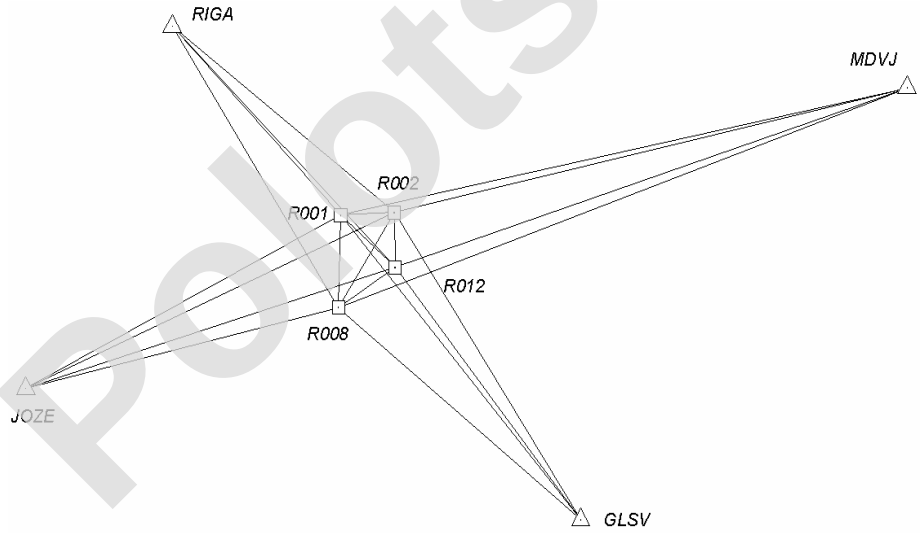


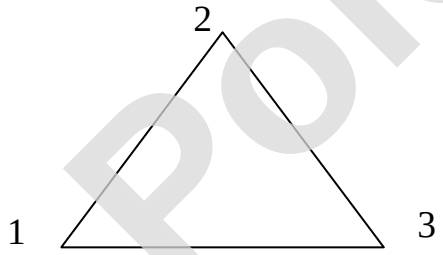
Рис. Схема привязки 4 долговременных пунктов ГДП «Белорусская АЭС» (*R001, R002, R008, R0012*) к пунктам IGS сети (*RIGA, MDVJ* (Менделеево), *JOZE, GLSV*(Киев))

Изложенный подход к выполнению математической обработки был исследован в [7]. Результаты исследования показали, что он не оправдал себя, так как усложнил методику измерений и математической обработки, в результате которой получились нереально большие векторы смещений, и

привел к возникновению большого числа вопросов, включая и проблему ошибок исходных данных. Там же сделан вывод, что оптимальным подходом к обработке сетей на локальных ГДП является уравнивание в программном продукте используемого высокоточного спутникового оборудования без привязки к IGS пунктам относительно одного центрального пункта сети ГДП, принятого за стабильный. На наш взгляд, такой подход максимально приближает к уравниванию сетей ГДП как свободных, без исходных пунктов, о чем говорилось выше.

Обратимся далее еще к одной группе характеристик горизонтальных деформаций, широко используемых при обработке повторных геодезических измерений на локальных ГДП [3, 4, 6, 11–12]. В этой группе деформационные характеристики, названные компонентами деформаций, определяются по результатам геодезических измерений на основе теории упругости по разностям непосредственно измеренных геодезических величин между эпохами, а также по разностям уравненных координат. Остановимся на нахождении компонентов деформаций по разностям уравненных координат между эпохами наблюдений как наиболее распространенном на практике.

Как известно, в соответствии с теорией дифференциального описания деформаций сплошных сред к компонентам деформаций отнесены следующие характеристики: дилатация *Q*, максимальное и минимальное растяжения *E1, E2*, направления максимального и минимального растяжений φ_{E1}, φ_{E2}, максимальный сдвиг γ_m и вращение *w*. Они вычисляются для каждого треугольника геодезической сети, принимаемого за конечный элемент, из решения системы линейных уравнений (15) по формулам (17–21).



$$\begin{cases} \Delta Y_1 = X_1 e_{21} + Y_1 e_{22} + b \\ \Delta X_1 = X_1 e_{11} + Y_1 e_{12} + a \\ \Delta X_2 = X_2 e_{11} + Y_2 e_{12} + a \\ \Delta Y_2 = X_2 e_{21} + Y_2 e_{22} + b \\ \Delta X_3 = X_3 e_{11} + Y_3 e_{12} + a \\ \Delta Y_3 = X_3 e_{21} + Y_3 e_{22} + b \end{cases} \quad (15)$$

где 1–2–3 – треугольник геодезической сети;

a, b – величины поступательного перемещения по осям *X, У*;

ΔX, ΔУ – разности координат пунктов треугольника сети;

X, У – координаты пунктов треугольника сети для любой из сравниваемых эпох, обычно берутся для первой;

$e_{11}, e_{12}, e_{21}, e_{22}$ компоненты тензора деформаций T_{ij} (16).

PolotskSU

$$\left|T_{ij}\right| = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{vmatrix}, \qquad (16)$$

$$Q = \frac{e_{11} + e_{22}}{2}, \qquad (17)$$

$$E1 = Q + \frac{1}{2}\sqrt{\left(e_{11} - e_{22}\right)^2 + \left(e_{12} + e_{21}\right)^2}, \qquad (18)$$

$$E2 = Q - \frac{1}{2}\sqrt{\left(e_{11} - e_{22}\right)^2 + \left(e_{12} + e_{21}\right)^2}, \qquad (19)$$

$$\gamma_m = E1 - E2 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}, \qquad (20)$$

где γ_m – максимальный сдвиг;

$\gamma_1 = \left(e_{11} - e_{22}\right)$ и $\gamma_2 = \left(e_{12} + e_{21}\right)$ – компоненты сдвига.

$$\phi_{E1,E2} = \frac{1}{2} arctg\left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) + A^0. \qquad (21)$$

Компоненты деформации замечательны тем, что они существенно в меньшей степени, чем векторы горизонтальных смещений, подвержены влиянию ошибок исходных данных. Согласно исследованиям Есикова Н.П. [9] сдвиговый компонент деформаций γ_m полностью, а оставшиеся компоненты частично инвариантны к отсчетной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко, М.Д. Определение современных движений земной коры из повторных измерений / Герасименко М.Д., Шароглазова Г.А. // Геодезия и картография. – 1985. – № 7. – С. 25–29.
2. Данилов, В.В. Методы обработки повторных геодезических измерений, проводимых в целях выявления горизонтальных деформаций земной коры / Данилов В.В. // Тр. геофизического ин-та. – 1949. – №5 (132). – С. 115–133.
3. Есиков, Н.П. Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности / Есиков Н.П. – М. :Наука, 1979. – 152 с.
4. Кучай, В.К. Поле тектонических напряжений, сейсмичность и орогенез / Кучай В.К. // Геофизические поля и сейсмичность. – М. : Наука, 1975. – С. 144–159.
5. Остач, О.М. Методическое руководство по геодезическим работам на геодинамических полигонах / Остач О.М., Дмитроченков В.Н. – М. : ЦНИИГАиК, 1984.
6. Шароглазова, Г.А. Применение геодезических методов в геодинамике / Шароглазова Г.А. – Новополоцк : ПГУ, 2002. –192 с.

PolotskSU

7. Шароглазова, Г.А. Анализ методики обработки повторных ГНСС наблюдений на геодинамических полигонах АЭС / Г.А. Шароглазова, В.В. Ялтыхов, К.И. Маркович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2015. – №16. – С. 114-117.
8. Bernese GNSS Software, Version 5.2 Tutorial.
9. Brunner, F.K. A comparison of computation methods for crustal strains from geodetic measurements / F.K. Brunner, Coleman R. and Hirsch // Tectonophysics. – 1981. – V. 71.
10. Koch, K.R. Multivariate hypothesis tests for detecting Recent crustal movements / K.R. Koch and Fritsch D. // Tectonophysics. – 1981. – V. 71.
11. Tsuboi, C. Investigation on the deformation of Earth′ s crust found by precise geodetic means / C. Tsuboi. // Jap. J. Astron. Geophys. – 1933. – 10, 93.
12. Frank, F.C. Determination of the Earth Strains from Survey Data / F.C. Frank. – Bul. Seismol Soc. Am. – 1933. – 56. – P. 34 – 42.

INFLUENCE OF ERRORS OF INPUT DATAS ON PARAMETERS OF HORIZONTAL DEFORMATIONS OF CRUST ON GEODYNAMIC GROUNDS

G. SHAROGLAZOVA, V. KOROVKIN

Article is devoted to a problem of errors of input datas when determining characteristics of the deformations of crust determined on geodynamic grounds by differences of the balanced coordinates between eras of measurements. It is shown that this problem is not removed upon transition to satellite measuring instruments.

Keywords*: modern movements of the Earth's crust, the geodynamic polygon repeated geodetic measurements.*

УДК 528.22.551.24 (075.8)

ОРГАНИЗАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА «ПОЛОЦКАЯ ГЭС»

канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА, К.И. МАРКОВИЧ
(Полоцкий государственный университет, Беларусь);
А.А. СВЯТОГОРОВ
(«НПЦ по геологии» НАН Беларуси);
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ
(Полоцкий государственный университет, Беларусь)

Рассматривается организация классического геодинамического полигона на территории, подверженной взаимообусловленному влиянию тектонических и техногенных факторов. Показана необходимость участия при проектировании полигона специалистов различных наук о Земле. Особое внимание

PolotskSU