

УДК 528.482:625.42

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-45-57

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ ОБНАЖЕНИЙ ВЫЕМКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Хабиб Мазен Хатум

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, аспирант кафедры инженерной геодезии, тел. (952)234-69-86, e-mail: habib.hatoum@gmail.com

Мурат Газизович Мустафин

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геодезии, тел. (812)328-86-84, e-mail: mustafinm@mail.ru

В геодезической практике применение при мониторинге деформационных процессов роботизированных тахеометров становится нормой. При этом используются различные программные комплексы по обработке измеренных величин и их визуализации. Вместе с тем, вопросы оптимизации деформационной сети и интерпретации результатов наблюдений остаются и сегодня весьма актуальными. Кроме того, обеспечение стабильности контрольных (исходных) точек все еще остается проблемой при решении различных задач, и прежде всего при мониторинговых наблюдениях. Ранее априори принималось, что исходные пункты, размещенные за пределами зоны влияния наблюдаемого объекта, считаются стабильными. Однако для достижения надежных результатов при различных измерениях стабильность исходных пунктов должна проверяться, и это следует рассматривать как дополнительный параметр мониторинга. Разработки в этом направлении имеются, и они связаны с рассмотрением смещений и деформационных марок и исходных пунктов в единой системе (сети). Результаты исследований, представленные в настоящей статье, обладают новизной в части методологии и алгоритма расчета координат станций наблюдения, деформационных марок и исходных пунктов без построения единой сети. Вместе с тем, каждый цикл наблюдений предусматривает оценку стабильности всех пунктов. Методика наблюдений разработана применительно к строительству инженерного сооружения: грунтовой выемке для вестибюля метрополитена. Последовательно рассмотрены вопросы оптимизации места местоположения станций наблюдения, деформационных марок и оценки точности их смещений. При анализе относительных смещений деформационных марок сравниваются эллипсы ошибок их положений, что позволяет определить вектора направления смещений и ожидаемую деформацию. Если полученное перемещение между циклами измерений выходит за пределы этого эллипса, то тогда можно говорить о значимости перемещения и его направлении. Рассмотрен также упрощенный способ обнаружения смещений исходных пунктов путем сравнения элементов остаточных матриц, определяемых в разных циклах наблюдений.

Ключевые слова: мониторинг, инженерные сооружения, геодезические наблюдения, метод наименьших квадратов, исходные пункты, деформационная сеть, смещения, деформации

Введение

При строительстве и эксплуатации различных сооружений последние испытывают нагрузки и соответственно деформации. Задача инженерных служб – обеспечение допустимого уровня этих деформаций. Существует довольно много способов их контроля [1–3]. При инженерных изысканиях выполняются специальные инженерно-геодезические изыскания, в результате которых проектируется

комплекс работ по наблюдениям за деформациями [4–6]. Традиционные методики наблюдений предусматривают создание исходных пунктов, которые закладываются в местах, где исключается деформационный процесс, и деформационных марок (сети), которые непосредственно отражают изучаемые возможные подвижки [4, 7, 8]. В последние время в геодезической практике находит применение модельный принцип оценки деформаций [2, 5], заключающийся в рассмот-

рении исходных пунктов и деформационных марок в единой системе. При этом по смещениям элементов этой системы (например, линий, треугольников, тетраэдров) проводится оценка смещений деформационных марок (в единой сети выделяются смещенные и не смещенные элементы, по координатам последних определяются смещения и координаты смещенных точек). Преимущества такого подхода состоят в том, что проверка устойчивости исходных реперов выполняется таким же способом, как и стабильность всех элементов системы [5, 7, 9, 10].

Методика исследований и результаты

Сначала рассмотрим традиционную методику, при использовании которой результаты наблюдений жестко привязаны к исходным пунктам. При этом специфика состоит в применении роботизированных станций наблюдений и исследовании оптимальных условий их работы. Речь идет о расчете (моделировании) схемы опорных (исходных) пунктов, при которых обеспечивается максимальная точность определения координат роботизированной станций и соответственно наблюдений деформационных марок.

Второй этап – обеспечение оптимизации расположения деформационных марок, которое выполняется с привлечением геотехников или геомехаников ввиду необходимости предварительной оценки деформационного процесса. В настоящей работе показано моделирование деформированного состояния исследуемого объекта (обнажение котлована под вестибюль станции метро), результаты которого позволили определить местоположение деформационных марок. Вопрос весьма актуален, так как без такого анализа можно либо использовать завышенное количество деформационных марок, либо их может быть недостаточно.

Объектом исследования является будущий вестибюль станции метро (Эр-Рияд, Саудовская Аравия). Выемка прямоугольной формы, размерами (L, S1S2 – S3S4): длина 134 м и ширина (l, S2S3 – S1S4) 25 м (рис. 1). Рядом с контуром выемки (AB) находится действующая дорога, а с другой располагается парковка торгового центра. В этой связи наблюдения направлены на оценку деформаций этих элементов выемки. В торцевых обнажениях заложены туннели метрополитена и в окрестностях этих участков процесс деформирования завершен.

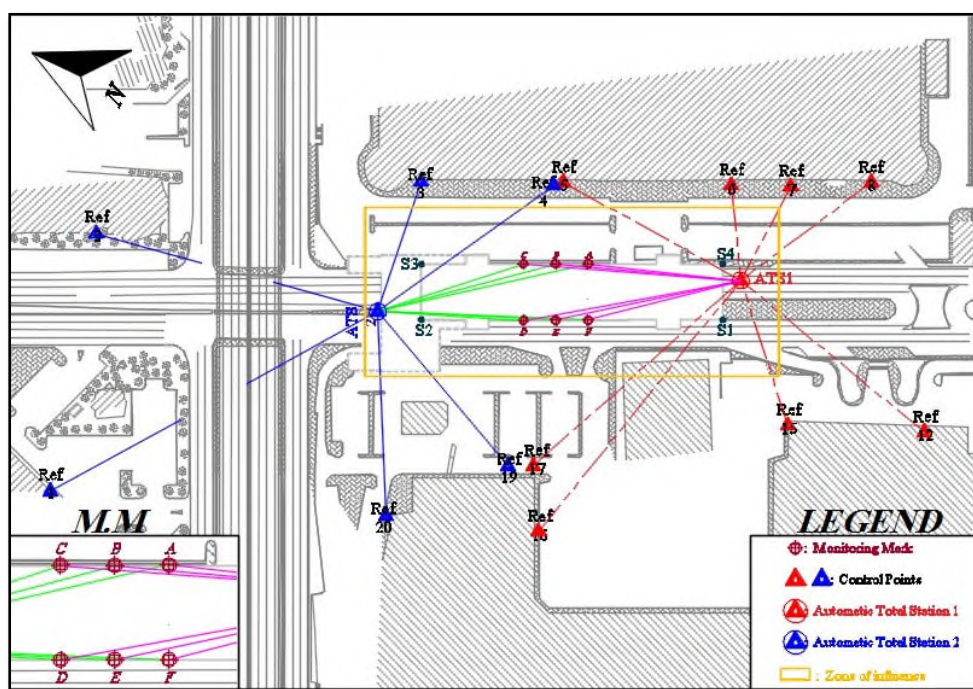


Рис. 1. План участка выемки под вестибюль метро с указанием расположения исходных пунктов (Ref) станций наблюдений (ATS) и деформационных марок (A-F)

Для наблюдения за деформациями необходимо было запроектировать расположение станций наблюдений. Принято расположение станций наблюдения вблизи сторон выемки S2S3 и S1S4 (см. рис. 1), при которых обеспечиваются наиболее устойчивое положение станций наблюдения и обзор деформационных марок.

Выше было отмечено, что от точности места расположения тахеометрической станции зависит точность определения абсолютных координат деформационных марок. В этой связи выполнены расчеты погрешности местоположения станции наблюдения (ATS) при различных положениях исходных пунктов. Рассмотрен упрощенный (одноформульный) и строгий способ с привлечением метода наименьших квадратов.

Выполнены расчеты по схеме обратной засечки. Точность обратной засечки по упрощенному способу рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$m_{O3} = \frac{m_{\beta} \cdot S_{PB}}{\rho \cdot \sin(\beta_1 + \beta_2 + \gamma)} \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{PA}}{b_{AB}}\right)^2 + \left(\frac{S_{PC}}{b_{BC}}\right)^2}, \quad (1)$$

где m_{O3} – среднеквадратическая погрешность определения координат определяемой точки (P); m_{β} – погрешность угловых измерений; S – горизонтальное расстояние; b_{AB} , b_{BC} – исходные стороны; $\rho = 206265''$.

Средняя квадратическая погрешность m_{O3} рассчитывается на основе измеренных углов β_1 и β_2 (координаты точек А, В и С известны, рис. 2). Угол γ и расстояние PB вычисляются (расстояние PB вычислено для контроля). По формуле (1) вычислены m_{O3} и отображены в табл. 1 (при $m_{\beta} = 0,5''$ и $m_s = 0,6$ мм).

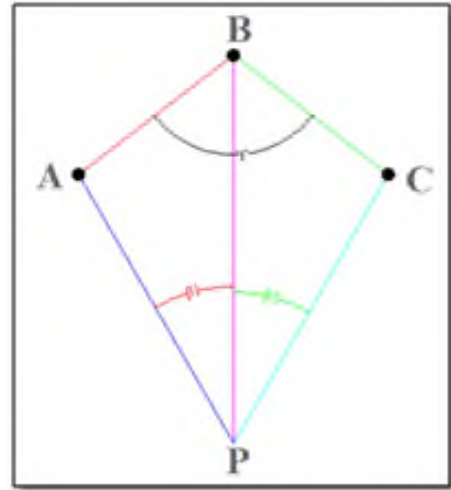


Рис. 2. Схема обратной засечки (без избыточных измерений)

Полученные результаты расчетные и при этом учтено лишь влияние геометрии построения обратной угловой засечки на точность вычисления координат.

Таблица 1

Погрешность (m_{O3}) по упрощенному способу (углы принято приводить в градусах, минутах и секундах, но это не принципиально)

	от	до	ГР	β_1	β_2	γ	m_{O3} , мм
ATS1	ATS1	Ref 5	89,877	55,465	58,577	182,187	0,193
	ATS1	Ref 6	42,502				
	ATS1	Ref 8	72,384				
	Ref 6	Ref 5	74,525				
	Ref 6	Ref 8	61,947				
ATS2	ATS2	Ref 3	60,691	36,189	85,518	82,2395	0,716
	ATS2	Ref 4	96,167				
	ATS2	Ref 19	89,622				
	Ref 4	Ref 3	59,250				
	Ref 4	Ref 19	126,242				

Как видно из полученных результатов, погрешности точки Р сильно отличаются при разных соотношениях углов и расстояний. Этот способ ограничен количеством исходных пунктов (3) и очень зависит от углов и геометрии схемы. Следует отметить, что в реальных строительных проектах соблюдение углов, обеспечивающих требуемую точность, может оказаться трудновыполнимой задачей. Кроме того, результаты этого способа показывают, что достигнутая весьма высокая точность (здесь снова следует подчеркнуть, что достигнутая точность модельная, не учитывающая погрешности фактических измерений) может быть недостаточной при наблюдениях за деформациями и следует изыскать возможность ее повышения.

Так, результаты расчетов показали (см. табл. 1), что погрешность (m_{03}) при хорошей

геометрии схемы составила 0,193 мм, эту величину можно считать весьма высокой. Путем использования большего количества исходных пунктов и обработки измерений методом наименьших квадратов (МНК) можно повысить точность. При моделировании измерений с использованием МНК количество исходных пунктов принято равным 8, а количество наблюдений равно 16 (8 горизонтальных расстояний и 8 направлений). При этом мы переходим к схеме линейно-угловой засечки. Неизвестными являются две координаты (X_{ATS1} и Y_{ATS1} , см. рис. 1) поэтому избыточные измерения: $(16 - 2) = 14$. При использовании МНК в качестве ориентировочных координат для первого приближения взяты координаты, полученные из решения по первому способу. Измеренные значения (8 расстояний и 8 направлений) представлены в табл. 2.

$$B = \begin{pmatrix} 0,9228343 & -0,3851971 \\ -0,0620021 & -0,9980760 \\ -0,8573553 & -0,5147251 \\ -0,9989837 & 0,0450727 \\ -0,8862261 & 0,4632529 \\ 0,2450712 & 0,9695051 \\ 0,7244442 & 0,6893335 \\ 0,9732097 & -0,2299193 \\ -0,1788631 & -0,4285106 \\ -0,6362721 & 0,0395263 \\ -0,6947393 & 1,1571971 \\ 0,0544941 & 1,2077965 \\ 0,3666904 & 0,7014971 \\ 0,5260934 & -0,1329857 \\ 0,5833693 & -0,6130828 \\ -0,0919552 & -0,3892309 \end{pmatrix}; \quad W = \begin{pmatrix} -0,0003509 \\ 0,0000859 \\ 0,0001644 \\ -0,0010348 \\ -0,0007975 \\ -0,0019152 \\ -0,0010515 \\ 0,0000237 \\ -0,0000500 \\ -0,0005949 \\ -0,0017533 \\ -0,0016566 \\ -0,0011865 \\ -0,0001955 \\ -0,0006713 \\ -0,0000851 \end{pmatrix};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_S = 0,0006 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{ГР} \quad (\text{м}); \\ m_\beta = \frac{0,5''}{3600}; \\ i = 1 \rightarrow \left(\frac{n}{2}\right); \quad j = \left(\frac{n}{2} + 1\right) \rightarrow n; \\ P_{i,i} = \frac{\mu_0^2}{(m_{S_i})^2}; \quad P_{j,j} = \frac{\mu_0^2}{(m_\beta)^2}; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$P = \begin{pmatrix} 1910969,54 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 51840000 \end{pmatrix};$$

$$N = B^T \cdot P \cdot B \quad (\text{нормальная матрица}); \quad (3)$$

$$Q = N^{-1} \quad (\text{обратная матрица}); \quad (4)$$

$$U = B^T \cdot P \cdot W \quad (\text{матрица нормированных коэффициентов параметрических уравнений}); \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = N^{-1} \cdot U \text{ (матрица коррекции для приближенных координат);} \quad (6)$$

$$\hat{V} = B \cdot \hat{\beta} - W \text{ (остаточная матрица);} \quad (7)$$

$$\text{уровненные координаты} = \begin{pmatrix} X_{Appx} \\ Y_{Appx} \end{pmatrix} + \hat{\beta} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 167918,298 \\ 2437627,4879 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Таблица 2

Измеренные величины, координаты исходных пунктов
и примерные координаты наблюдательной станции

Необработанные измерения				№ точки	X (m)	Y (m)
от	до	Направление	ГР (m)			
ATS1	REF 17	0,0000	123,3910	REF 17	167805,0602	2437675,0190
ATS1	REF 5	70,8982	89,8760	REF 5	167924,5025	2437717,1920
ATS1	REF 6	126,3632	42,4500	REF 6	167955,3246	2437649,3390
ATS1	REF 7	159,9258	47,3890	REF 7	167966,2719	2437625,3530
ATS1	REF 8	184,9401	72,3830	REF 8	167983,0784	2437593,9570
ATS1	REF 12	261,5299	105,5849	REF 12	167893,0537	2437525,1220
ATS1	REF 15	293,7660	67,7020	REF 15	167869,8829	2437580,8190
ATS1	REF 16	350,6363	143,2590	REF 16	167779,5090	2437660,4270
				≈ ATS 1	167918,9300	2437627,4890

Априорные СКП положения точки

$$a \text{ priori} = \left\{ \begin{array}{l} \mu_0^2 = 1 \\ m_x = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{1,1}} \\ m_y = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 1,056 \cdot 10^{-4} \\ m_y = 7,124 \cdot 10^{-5} \\ m_{xy} = 1,008 \cdot 10^{-4} \end{array} \right\}; \quad (9)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T \cdot P \cdot V}{r}}; \quad r = n - t. \quad (10)$$

Апостериорные (с учетом поправок) СКП положения точки

$$a \text{ posteriori} = \left\{ \begin{array}{l} \mu = 0,787 \\ m_x = \mu \cdot \sqrt{Q_{1,1}} \\ m_y = \mu \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 8,317 \cdot 10^{-5} \\ m_y = 5,609 \cdot 10^{-5} \\ m_{xy} = 7,932 \cdot 10^{-5} \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Расчет был выполнен с использованием программного обеспечения MathCAD, и результаты показали, что даже априорные СКП положения определяемой точки (ATS1) $m_x, m_y = 0,101$, что меньше 0,193 мм (результат по первому способу). При вычислении же апостериорной СКП (с учетом поправки) был получен результат: $m_{xy} = 0,07932 \lll 0,193$ мм.

Та же процедура была сделана для вычисления точности АТС2, и результаты суммированы.

АТС 1. *Априорные СКП:* $m_x = 0,1056$ мм; $m_y = 0,07124$ мм; $m_{xy} = 0,1008$ мм.

Апостериорные СКП: $m_x = 0,08317$ мм; $m_y = 0,05609$ мм; $m_{xy} = 0,07932$ мм.

АТС 2. *Априорные СКП:* $m_x = 0,1492$ мм; $m_y = 0,1074$ мм; $m_{xy} = 0,1519$ мм.

Апостериорные СКП: $m_x = 0,03841$ мм; $m_y = 0,02766$ мм; $m_{xy} = 0,03911$ мм.

Таким образом, из приведенных результатов расчетов вытекает, что при определении координат станций наблюдений следует использовать модельный принцип на основе МНК. Речь идет главным образом о модельном определении координат и о предрасчете точности измерений, на базе которого наглядно возможен выбор места расположения тахеометрической станции.

Проектирование деформационной сети. Для оценки деформационного процесса обнажений выемки (S1 – S2 и S3 – S4, см. рис. 1) проведены тестовые расчеты ее напряженно-деформированного состояния (НДС), которые позволили определить количество и порядок размещения деформационных марок.

Моделирование выполнялось с использованием метода конечных элементов [11, 12]. Применялся программный комплекс «Недра» [13]. Расчетная модель представляет собой вертикальный срез грунтовой выемки (рис. 3, а). Размеры выемки соответствуют схеме (см. рис. 1) (цифрами обозначены расстояния в метрах). Выемка образована в крепких породах типа песчаника или гранита. В этой связи грунтовой массив моделировался с модулем упругости 10 ГПа. Породы основания сооружения имеют еще большую упругость 20 ГПа. Рассматривалась упругая задача о напряжениях. Размеры модели подобраны таким образом, чтобы обеспечивалось корректное решение задачи, и не было влияния краевых условий на возмущения в массиве от выемки. На границах модели приняты следующие условия: левая и правая границы неподвижны в горизонтальном направлении и разрешены вертикальные перемещения; нижняя граница закреплена в вертикальном направлении и свободна для горизонтальных смещений; верхняя граница не закреплена.

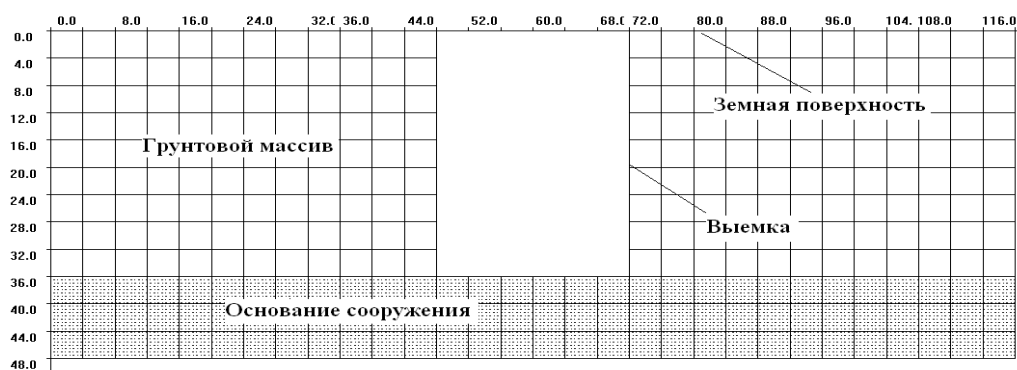
Результаты расчета смещений в горизонтальном направлении представлены на рис. 3, б.

Как видно, наибольшие смещения стенок ожидаются в средней части поверхности выемки, несколько больше в сторону ее подошвы.

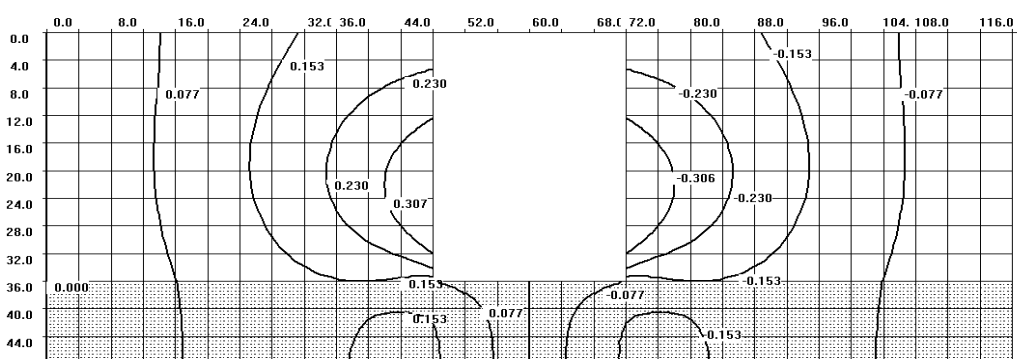
Определено также, что разрушения в приконтурных областях выемки возможны, но когда прочность на одноосное сжатие превысит 1 МПа. С учетом того обстоятельства, что прочность песчаника и гранита пород существенно больше (>10 МПа), анализ смещений лишь по упругому расчету вполне корректен. Вместе с тем, нельзя исключать дефектность пород в приконтурной к выемке зоне, представленной трещиноватостью пород. Собственно по причине невозможности досконального предвидения процесса деформирования и выполняются геодезические наблюдения. В итоге на основе приведенных выкладок деформационные марки были размещены в средней части выемки (см. рис. 1), где по геометрическим условиям ожидаются наибольшие деформации. По вертикали заложены четыре ряда марок через шесть метров с отступом от земной поверхности на 4 м. Таким образом, деформационные марки охватывали всю зону максимальных смещений пород в боковых обнажениях выемки (рис. 3, б).

Оценка стабильности геодезической сети, алгоритм обнаружения смещений деформационных марок и возможных смещений исходных пунктов

Согласно теории ошибок и результатам анализа с использованием МНК, случайную ошибку можно отличить от систематической или грубой, проверив невязки и определив, соответствует ошибка нормальному распределению или нет. Такая же процедура может быть применена и для обнаружения деформации геодезической сети. Следовательно, использование МНК необходимо для мониторинга деформации, поскольку смещение может быть быстро обнаружено путем анализа и сравнения остаточной матрицы между двумя разными циклами наблюдений. На примере покажем, как определить, сместился ли исходный пункт, произошла ли деформация пород у марок или смещение тахеометрической станции.



а)



б)

Рис. 3. Результаты моделирования смещений боковых обнажений выемки:

а) модель выемки; б) распределение горизонтальных смещений в приконтурном к выемке массиве

Эллипс ошибок определяется с определенной доверительной вероятностью его большей полуосью (a) и малой осью (b), а также углом поворота (φ). Эллипс представляет собой ожидаемую величину ошибки (значение и направление), его возможно описать кругом радиуса (R) и тогда измеренные величины должны располагаться внутри этого круга, в противном случае либо измерения выполнены некорректно, либо имеет место деформация измеряемого объекта.

Формулы для элементов пересчитанного эллипса ожидаемого смещения и соответствующего круга смещения приведены ниже:

$$\lambda_1 = \frac{q_{\hat{x}\hat{x}_i} + q_{\hat{y}\hat{y}_i} + k}{2}; \quad (12)$$

$$\lambda_2 = \frac{q_{\hat{x}\hat{x}_i} + q_{\hat{y}\hat{y}_i} - k}{2}; \quad (13)$$

$$k = \sqrt{(q_{\hat{x}\hat{x}_i} - q_{\hat{y}\hat{y}_i})^2 + 4q_{\hat{x}\hat{y}_i}^2}; \quad (14)$$

$$a = \mu_0 \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot \chi_{2,1-\alpha}^2}; \quad (15)$$

$$b = \mu_0 \cdot \sqrt{\lambda_2 \cdot \chi_{2,1-\alpha}^2}; \quad (16)$$

$$R = \sqrt{a \cdot b}; \quad (17)$$

$$\operatorname{tg}(2\varphi) = \frac{2q_{\hat{x}\hat{y}_i}}{q_{\hat{x}\hat{x}_i} - q_{\hat{y}\hat{y}_i}}, \quad (18)$$

где $\chi_{2,1-\alpha}^2$ – распределение хи-квадрат для двух степеней свободы; α – вероятность события; $\alpha = 0,05$ для 95-процентной степени достоверности; φ – угол поворота эллипса; λ_1 и λ_2 – значения матрицы кофактора (Q); $q_{i,i}$ – элементы матрицы кофактора (Q).

В табл. 3 приведены соответствующие параметры эллипса и круга для 95-процентной степени достоверности с целью иллюстрации обнаружения смещений.

Эллипс и круг для 95-процентной степени достоверности

Точка	95-процентная степень достоверности эллипса и круга							
	априорные				апостериорные			
	<i>a</i> (мм)	<i>b</i> (мм)	<i>r</i> (мм)	φ (градус)	<i>a</i> (мм)	<i>b</i> (мм)	<i>r</i> (мм)	φ (градус)
ATS 1	0,6524	0,39646	0,50858	17,77696	0,51364	0,31214	0,40041	17,77696
ATS 2	0,90446	0,62829	0,75383	12,34863	0,23292	0,1618	0,19413	12,34863

По начальным измерениям остаточная матрица V вычислена согласно уравнению (7). Для удобства рассмотрения деформаций назовем ее остаточной матрицей, которая сохраняется для сравнения с остаточными матрицами для различных случаев моделирования: вариант 1, точка 12 была смещена (изменение только горизонтального расстояния); вариант 2, точка 12 была смещена (изменение горизонтального направления и расстояния); вариант 3, все расстояния и направления были изменены.

В табл. 4 приведены вычисленные данные для определения вида ошибки (деформации).

Сравнивались остаточные матрицы в разных циклах наблюдений. Остаточная матрица начального наблюдения ($V_{\text{нач}}$) рассматривается как базовая.

В рассматриваемых случаях, когда изменяли горизонтальное расстояние между контрольной точкой Ref 12 и ATS1 на 5 мм (V_1), в результате сравнения матриц ($V_1 - V_{\text{нач}}$) определено значение 4,935 мм. Затем мы также изменили горизонтальное направление для Ref12 и, используя остаточную матрицу и сравнив ее с исходной матрицей ($V_2 - V_{\text{нач}}$), смогли найти деформацию, а также определить дополнительные смещения.

Обнаружение любого изменения в горизонтальном направлении может быть выполнено сравнением матриц ($V_2 - V_1$), где смещение определяется по максимальным значениям. При сравнении $V_3 - V_{\text{нач}}$ (третий случай) предполагается возможность смещения самой тахеометрической станции.

Немаловажно отметить, что задача оценки деформационных процессов напрямую зависит от точности измерений. Здесь возникает вопрос: использовать приборы высокой точ-

ности или менее точные, но по более усложненной схеме наблюдений. Последние и определяют целесообразность модельного определения этой схемы.

Следующие испытания выполнены для проверки способности вышеобозначенной модели обнаруживать смещения пунктов и их направления, включая исходные пункты.

Расстояния и направления до деформационных марок измерялись с помощью тахеометра Leica TM50 с точностью $\pm 0,6$ мм при измерении расстояний и 0,5 секунды для горизонтальных углов. Координаты тахеометрической станции (TS) определялись на основе традиционной обратной угловой засечки. При этом точность позиционирования рассчитывается по нижеследующим известным [1] формулам и показана в табл. 1

$$m_{xy}^2 = m_{\text{оз}}^2 + m_{\text{изм}i}^2; \quad (19)$$

$$m_{xy} = \sqrt{m_{\text{оз}}^2 + m_{\text{изм}i}^2}; \quad (20)$$

$$m_{\text{изм}i} = \sqrt{m_S^2 + \left(\frac{m_B}{\rho}\right)^2 \cdot S^2}, \quad (21)$$

где S – измеренное горизонтальное расстояние; $m_{\text{оз}}$ – точность обратной засечки; m_S – паспортная точность прибора для измерения расстояния; m_B – паспортная точность прибора для измерения горизонтального угла.

Погрешность определения координат марок, полученная с одной станции (со станции ATS 1, см. табл.4), составила около 0,7 мм. В соответствии с нормативами при расчетных значениях осадок до 50 мм СКП измерений деформации не должна быть более 1 мм, а в эксплуатационный период – не более 0,5 мм (для песчаных грунтов).

Таблица 4

Данные для обнаружения деформаций с использованием остаточной матрицы

		Выявленные деформации (смещения)								
	Наименование исходной точки	$V_{нач}$	V_1	V_2	V_3	Единицы измерений	$V_1 - V_{нач}$	$V_2 - V_{нач}$	$V_2 - V_1$	$V_3 - V_{нач}$
Горизонтальные смещения	REF 17	0,634	0,658	1,016	-4,770	мм	0,024	0,382	0,358	-5,404
	REF 5	1,043	0,985	0,926	3,667	мм	-0,058	-0,116	-0,059	2,624
	REF 6	0,550	0,480	0,118	4,749	мм	-0,070	-0,432	-0,362	4,199
	REF 7	1,145	1,099	0,699	6,076	мм	-0,046	-0,446	-0,400	4,931
	REF 8	0,421	0,403	0,063	5,958	мм	-0,018	-0,358	-0,341	5,537
	REF 12	0,789	-4,146	-4,014	-2,575	мм	-4,935	-4,804	0,131	-3,364
	REF 15	0,163	0,236	0,550	-3,850	мм	0,073	0,387	0,314	-4,012
	REF 16	0,078	0,112	0,496	-5,064	мм	0,035	0,418	0,383	-5,142
Направления	REF 17	2,012	1,897	1,586	4,398	секунды	-0,116	-0,427	-0,311	2,386
	REF 5	2,350	2,247	1,331	-2,513	секунды	-0,104	-1,019	-0,916	-4,864
	REF 6	2,045	2,151	1,287	3,915	секунды	0,107	-0,758	-0,865	1,870
	REF 7	1,059	1,307	1,532	3,356	секунды	0,248	0,473	0,226	2,296
	REF 8	1,229	1,432	2,047	0,521	секунды	0,203	0,818	0,616	-0,708
	REF 12	0,936	1,002	-3,253	5,218	секунды	0,066	-4,189	-4,255	4,282
	REF 15	4,553	4,534	5,304	5,947	секунды	-0,019	0,751	0,770	1,395
	REF 16	1,930	1,837	1,657	4,567	секунды	-0,093	-0,273	-0,180	2,637

Таблица 5

Результаты оценки точности наблюдений с одной станции наблюдения

		A	B	C	D	E	F
$m_{изм}$ (станция ATS1)	ГР (м)	68,1814	82,4553	96,7345	98,0312	84,0006	70,0012
	$m_{1изм}$ (мм)	0,6883	0,7111	0,7351	0,7374	0,7137	0,6912
	$m_1 = \sqrt{m_{оз}^2 + m_{изм1}^2}$ (мм)	0,7148	0,7368	0,76	0,7622	0,7393	0,7176
$m_{изм}$ (станция ATS2)	ГР (м)	95,6685	81,7117	67,997	64,7207	78,9916	93,3628
	$m_{2изм}$ (мм)	0,7333	0,7099	0,688	0,683	0,7055	0,7294
	$m_2 = \sqrt{m_{оз}^2 + m_{изм2}^2}$ (мм)	1,0247	1,0081	0,9928	0,9894	1,005	1,0219

Для повышения точности использованы дополнительные измерения и их обработка по МНК. Начальное приближение координат деформационных марок получили путем усреднения координат, полученных путем вычисления координат контрольных точек (ATS1 и ATS2, приближенные координаты необхо-

димы для улучшения процесса сходимости итерационного процесса).

В соответствии с уравнениями (2)–(11) вычисляем матрицы В, Р и W. В табл. 7 показаны Априорные СКП и Апостериорные СКП. Видно, что точность наблюдений повысилась относительно паспортной точности.

Таблица 6

Результаты измерений и приближенные координаты

Значения				Координаты		
от	до	Направления (градусы)	Расстояния (м)	Наименования пунктов	X (м)	Y (м)
ATSI	A	48,1948	68,1814	ATSI	167918,9298	2437627,4879
	B	47,0275	82,4553	ATSI	167837,1959	2437766,9154
	C	46,2948	96,7345	≈ A	167896,565	2437691,897
	D	31,4719	98,0312	≈ B	167890,302	2437704,814
	E	29,7458	84,0006	≈ C	167884,187	2437717,768
	F	27,2720	70,0012	≈ D	167861,487	2437706,926
ATS2	A	22,6880	95,6685	≈ E	167867,680	2437694,043
	B	20,5106	81,7117	≈ F	167873,867	2437681,056
	C	17,3309	67,9970			
	D	39,0020	64,7207			
	E	38,3452	78,9916			
	F	37,9181	93,3628			

Таблица 7

Погрешности определения координат марок после обработки измерений с двух станций

		Априорный (мм)	Апостриорный (мм)	Априорный (мм)		Апостриорный (мм)	
A	m_x	0,2	0,04	$m_{xy(m)}$	0,4	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,08				
B	m_x	0,2	0,05	$m_{xy(m)}$	0,4	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,07				
C	m_x	0,3	0,05	$m_{xy(m)}$	0,4	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,3	0,07				
D	m_x	0,2	0,05	$m_{xy(m)}$	0,5	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,08				
E	m_x	0,3	0,05	$m_{xy(m)}$	0,5	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,08				
F	m_x	0,3	0,05	$m_{xy(m)}$	0,5	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,07				

На рис. 4 представлена диаграмма, демонстрирующая значительное различие и увеличение точности определения координат при избыточных измерениях и использовании МНК, которая обосновывает необходимость его использования в работах по мониторингу.

Однако для обоснования и обеспечения достоверности и достаточности результатов необходимо сравнить предварительно рассчитанную точность с допустимой ошибкой

и допустимой точностью наблюдения, а затем может быть принято решение.

Достоверность и надежность результатов измерений и оценки деформации определяется по эллипсу ошибок, по которому также можно отличить ошибку измерений от деформаций (смещений марки). Рассчитав радиус (R) 95 % доверительного круга (по эллипсу ошибок), сравнивают его с вычисленными деформациями и если значение деформации превышает радиус R ($\Delta > R$), то она достоверна.

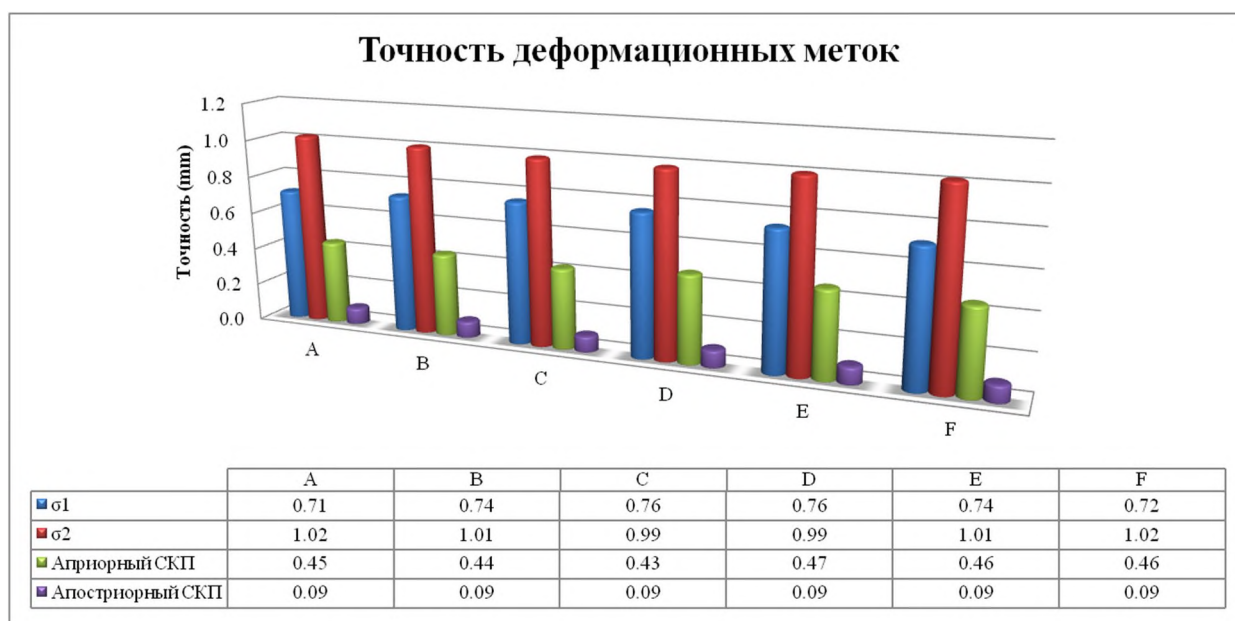


Рис. 4. Погрешности определения координат деформационных марок (упрощенный способ и МНК)

Таким образом, полученная точность определения координат деформационных марок отвечает требованиям, указанным в нормативном документе «Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. Грунты» (ГОСТ 24846–2012, Межгосударственный стандарт). Согласно этому ГОСТ допустимая погрешность измерения перемещений составляет 1 мм при расчетном значении вертикальных или горизонтальных перемещений до 50 мм.

Заключение

В статье представлен пример оценки точности геодезической сети специального назначения. Приведена предварительная оценка точно-

сти наблюдений при строительстве метро в Эр-Рияде (Саудовская Аравия) и выбраны схемы расположения пунктов геодезической сети для получения требуемой точности. При этом рассмотрен вопрос о выборе места расположения станций наблюдения, их количестве. Выполнен предрасчет деформированного состояния грунтовой выемки, что позволило обоснованно разместить деформационные марки.

Продемонстрировано использование при определении координат тахеометрической станции и деформационных марок традиционного (одноформульного) расчета и по МНК. Показана эффективность разработанной схемы мониторинга. Приведен алгоритм оценки деформаций по остаточным матрицам, а также по доверительному кругу ошибок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков В. Д., Ключин Е. Б., Васютинский И. Ю. Геодезия: Изыскания и проектирование инженерных сооружений : справ. пособие. – М. : Недра, 1991. – 238 с.
2. Ключин Е. Б, Заки М. З. Э.-Ш., Власенко Е. П. Оценка точности обратной угловой засечки // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 3. – С. 31–39.
3. Падве В. А., Мазуров Б. Т. Метод наименьших квадратов (статика, динамика, модели с уточняемой структурой) // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 22–35.
4. Caspary W. F., Haen W., Borutta H. Deformation analysis by statistical methods // Technometrics. – 1990. – Vol. 32, No. 1. – P. 49–57.
5. Even-Tzur G. Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks. Zeitschrift für Vermessungswes. – 2006. – Vol. 131, No. 2. – P. 87–95.

6. Grafarend E. W., Sansò F. Optimization and design of geodetic networks. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo : Springer Science & Business Media, 2012. – 698 p.
7. Horizontal deformation rate analysis based on multiepoch GPS measurements in Shanghai / J. Cai, J. Wang, J. Wu, C. Hu, E. Grafarend, J. Chen // J. Surv. Eng. – 2008. – Vol. 134, No. 4. – P. 132–137.
8. Hekimoglu S., Erdogan B., Butterworth S. Increasing the efficacy of the conventional deformation analysis methods: alternative strategy // J. Surv. Eng. – 2010. – Vol. 136, No. 2. – P. 53–62.
9. Aydin C., Demirel H. Computation of Baarda's lower bound of the non-centrality parameter // J. Geod. – 2004. – Vol. 78, No. 7–8. – P. 437–441.
10. Schaffrin B., Bock Y. Geodetic deformation analysis based on robust inverse theory // Manuscripta Geod. – 1994. – Vol. 19, No. 1. – 31 p.
11. Солопчук М. С. Харитонов А. О. Моделирование по методу конечных элементов движения графул на криволинейной деке // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Том. 29, № 2 (161). – С. 46–47.
12. Schaffrin B. New estimation/prediction techniques for the determination of crustal deformations in the presence of prior geophysical information // Tectonophysics. – 1986. – Vol. 130, No. 1–4. – P. 361–367.
13. Шек В. М., Е. А. Конкин, Литвинов А. Г. Программный комплекс «Недра» подсистемы геолого-маркшейдерского обеспечения АСУ горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 9. – С. 230–235.

Получено 15.04.2020

© Х. М. Хатум, М. Г. Мустафин, 2020

METHODOLOGY FOR DESIGNING AND EVALUATING RESULTS OF GEODESIC OBSERVATIONS OF ENGINEERING STRUCTURES USING THE LEAST SQUARE METHOD

Habib Mazen Hatoum

St. Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21 line, St. Petersburg, 199106, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy, phone: (952)234-69-86, e-mail: habib.hatoum@gmail.com

Murat G. Mustafin

St. Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21 line, St. Petersburg, 199106, Russia, D. Sc., Professor, Head of the Department of Engineering Geodesy, phone: (812)328-86-84, e-mail: mustafinm@mail.ru

In geodetic practice, the use of robotic total stations in monitoring the deformation processes becomes the norm. In this case, various software systems for processing the measured values and their visualization are used. At the same time, issues of optimizing the deformation network and interpreting the results of observations remain very relevant today. In addition, ensuring the stability of control (initial) points still remains a problem in solving various tasks, and above all in monitoring observations. Previously, it was a priori assumed that the starting points located outside the zone of influence of the observed object are considered stable. However, to achieve reliable results with various measurements, the stability of the starting points should be checked and this should be considered as an additional monitoring parameter. There are developments in this direction, and they are related to the consideration of displacements and deformation marks and starting points in a single system (network). The research results presented in this article are novel in terms of the methodology and algorithm for calculating the coordinates of observation stations, deformation marks, and starting points without building a single network. At the same time, each observation cycle provides an assessment of the stability of all points. The observation technique was developed in relation to the construction of an engineering structure: an excavation for the subway lobby. The issues of optimizing the location of observation stations, deformation marks (points), and assessing the accuracy of their displacements are successively considered. When analyzing the relative displacements of the deformation marks, the ellipses of the error of the position of the points are compared. If the resulting displacement between the measurement cycles goes beyond this ellipse, then speaking about the significance of the displacement and its direction is allowed. A simplified method for detecting the displacements of the starting points by comparing the elements of the residual matrices determined in different observation cycles is also considered.

Keywords: monitoring, engineering structures, geodetic observations, least squares method, reference points, deformation network, displacements, deformations

REFERENCES

1. Bolshakov, V. D., Klyushin, E. B., & Vasyutinsky, I. Yu. (1991). *Geodeziya: Izyskaniya i proektirovanie inzhenernykh sooruzheniy [Geodesy: Surveys and design of engineering structures: a reference guide]*. Moscow: Nedra Publ., 238 p. [in Russian].
2. Klyushin, E. B., Zaki, M. Z. E.-Sh., & Vlasenko, E. P. (2008). Evaluation of the accuracy of the reverse angular notch. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 31–39 [in Russian].
3. Padve, V. A., & Mazurov, B. T. (2017). Least squares method (static, dynamic, refined structure models). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 22–35 [in Russian].
4. Caspary, W. F., Haen, W., & Borutta, H. (1990). Deformation analysis by statistical methods. *Technometrics*, 32(1), 49–57.
5. Even-Tzur, G. (2006). Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks. *Zeitschrift für Vermessungswes.*, 131(2), 87–95.
6. Grafarend, E. W., & Sansò, F. (2012). *Optimization and design of geodetic networks*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Science & Business Media, 698 p.
7. Cai, J., Wang, J., Wu, J., Hu, C., Grafarend, E., & Chen, J. (2008). Horizontal deformation rate analysis based on multiepoch GPS measurements in Shanghai. *J. Surv. Eng.*, 134(4), 132–137.
8. Hekimoglu, S., Erdogan, B., & Butterworth, S. (2010). Increasing the efficacy of the conventional deformation analysis methods: alternative strategy. *J. Surv. Eng.*, 136(2), 53–62.
9. Aydin, C., & Demirel, H. (2004). Computation of Baarda's lower bound of the non-centrality parameter. *J. Geod.*, 78(7–8), 437–441.
10. Schaffrin, B., & Bock, Y. (1994). Geodetic deformation analysis based on robust inverse theory. *Manuscripta Geod.*, 19(1), 31 p.
11. Solopchuk, M. S., & Kharitonov, A. O. (2015). Modeling by the method of finite elements of the movement of granules on a curved deck. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Advances in Chemistry and Chemical Technology]*, Vol. 29, No. 2 (161), 46–47 [in Russian].
12. Schaffrin, B. (1986). New estimation/prediction techniques for the determination of crustal deformations in the presence of prior geophysical information. *Tectonophysics*, 130(1–4), 361–367.
13. Shek, V. M., Konkin, E. A., & Litvinov, A. (2007). The "Nedra" software package of the subsystem for geological and mine surveying support of a utomated control systems for mining enterprises. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mountain Information and Analytical Bulletin]*, 9, 230–235 [in Russian].

Received 15.04.2020

© Habib Mazen Hatoum, M. G. Mustafin, 2020