

УДК 528.063

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НИВЕЛИРНЫХ СЕТЕЙ  
ПРИ МОНИТОРИНГЕ ОСАДОК  
УНИКАЛЬНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

*Асп. УСОВ Д. В.*

*Полоцкий государственный университет*

Прогресс строительства, новая высокопроизводительная техника, современные технологии и материалы открывают перед архитекторами, проектировщиками возможности усложнения построек и создания уникальных по решениям сооружений. На сегодняшний день в Республике Беларусь, кроме строительства многочисленных типовых объектов, реализованы проекты различных уникальных зданий и сооружений (железнодорожный вокзал

г. Минска, подземный паркинг и торговый центр «Столица», Национальная библиотека Республики Беларусь, Летний амфитеатр г. Витебска, спортивный комплекс «Минск-Арена» и др.). Находятся в стадии проектирования и разработки проекты новых уникальных по решениям и конструктивно сложных объектов, таких как административно-деловой центр «Минск-Сити», 5-звездочный отель-небоскреб в г. Минске, атомная электростанция и др.

Но практически любой крупный строительный объект является уникальным как по своим конструктивным особенностям, так и в силу горно-геологической обстановки, в которой он создается и существует в дальнейшем. Однако чем сложнее строительная конструкция, тем больше вероятность выхода из строя любого элемента, тяжелее последствия и дороже ремонт. По этим причинам проблема постоянного контроля надежности, безопасности, строительного объекта в целом становится все более актуальной. К сожалению, действительность приводит весьма жесткие аргументы в пользу мониторинга зданий.

Первое, катастрофически быстрое изменение свойств пород и грунтов в недрах города в сторону ухудшения под влиянием городской инфраструктуры, прежде всего в результате утечек из систем ливневой, промышленной и фекальной канализаций, отопления и водоснабжения. Поступление агрессивных растворов в подземное геологическое пространство вызывает в породах необратимые изменения, которые потребуют в перспективе значительных затрат на борьбу с последствиями этого процесса.

Второе, экспансия городского строительства в недра города, в подземное пространство, которое является естественной, хотя и стремительно дряхлеющей основой большинства зданий и сооружений. Сегодняшних традиционных средств и способов инженерно-геологического изучения этого пространства на урбанизированной территории для проектирования крупных зданий уже не хватает. Задачи изысканий усложняются, глубина и объем исследований неуклонно возрастают.

Третье, проектирование и строительство крупных многофункциональных объектов, имеющих сегодня, как правило, несколько уровней подземного размещения, на свободных площадях, которые ранее традиционно и небезосновательно считались «неудобьями». Это борта речных долин (а русла рек закладывались по наиболее ослабленным зонам), береговые склоны (где нередко оползневые процессы), низкие пойменные террасы, заболоченные участки, площади развития карста и т. п.

Четвертое, естественное усложнение строительных объектов, возведение зданий повы-

шенной этажности (небоскребы), широкое применение большепролетных (пространственных) конструкций. Слабая инженерная защита крупных строительных котлованов при точечной плотной застройке города приводит к возникновению деформаций, иногда значительных, в окружающих зданиях. Известно, что создание крупного котлована провоцирует возникновение «активной зоны» радиусом 50–100 м, в пределах которой весьма высока вероятность возникновения осадков и появления трещин в соседних строениях [1, 2].

Перечисленные факторы и причины предопределяют осуществление мониторинга инженерных сооружений, который требует применения новых технических средств как для контроля геологической среды, так и для эксплуатационного контроля самого строительного объекта, современных приемов исследований и методов математической обработки результатов выполненных измерений.

В идеале в свете современных подходов к вопросам безопасности сооружений, новой концепции строительных технологий система геодезического мониторинга за деформациями должна разрабатываться уже на стадии проектирования и создаваться при строительстве объекта. В настоящее время наблюдения за осадками и горизонтальными смещениями производят либо по внутриведомственным наставлениям или руководствам, теоретический и технический уровень которых в лучшем случае базируется на инструкциях, либо реже по специально разработанным методикам и проекту производства геодезических работ. Большинство таких нормативных документов содержит, как правило, общую информацию по выполнению геодезических работ, а требуемая точность определяемых осадков обычно не используется в качестве исходной для обоснования необходимой методики измерений [3, 4].

Наряду с этим незаслуженно мало внимания уделяется вопросам проектирования наиболее выгодной формы схемы инженерно-геодезических измерений для определения осадков сооружений, тогда как на этом пути имеются широкие возможности, во-первых, для существенного повышения точности конечных результатов измерений и, во-вторых, для сокращения

времени, необходимого на выполнение очередного цикла наблюдений, что, в свою очередь, уменьшит экономические затраты. На сегодняшний день в геодезической и строительной практике часто используют произвольные геодезические сети, с помощью которых невозможно выполнить определение осадок инженерных сооружений и, как следствие, оценить состояние объекта, надежность проекта, качество выполнения работ, контролировать безопасность сооружения.

С этой целью должен быть разработан оптимальный проект формы геодезической сети, выполнена оценка ее качества, предвычислены технические допуски, обоснован выбор способа уравнивательных вычислений.

**Моделирование и математическая обработка геодезических построений.** Тестирования геодезических нивелирных сетей для определения деформаций сооружений выполнялись методом математического моделирования по специально разработанному программному продукту. Данный программный продукт позволяет выполнить уравнивание различных геодезических построений (нуль-свободных, свободных, несвободных) различными методами математической обработки (наименьших квадратов (МНК)), Lp-оценок или наименьших степеней, многокритериальной оптимизации, проанализировать влияние геометрии нивелирных геодезических сетей на определение деформаций, оценить надежность геодезических построений и качество определения осадок.

На протяжении всего модельного эксперимента полагалось, что на тестируемых объектах может возникнуть одно из следующих условий:

- осадок сооружений нет, есть только ошибки измерений;
- осадки есть, но они соизмеримы с ошибками измерений;
- осадки в  $z$  раз больше, чем ошибки измерений.

Программа тестирования нивелирных сетей функционирует по следующему алгоритму.

1. Задаем исходную информацию преимущественно по схеме сети:

- значение стандарта  $\sigma$  в миллиметрах, согласно которому генерировались осадки реперов в каждой эпохе;

- равноточные или неравноточные измерения;
- степень для метода математической обработки ( $n = 2$  для МНК);
- номер исходного пункта;
- номер эпохи наблюдений.

Информация об измеренных превышениях составляется начиная с любого превышения и должна содержать его порядковый номер, номер начального и конечного пунктов превышения. Величину превышений  $h$  задавать не требуется, так как программа генерирует значения разностей превышений из датчика псевдослучайных чисел таким образом, чтобы они подчинялись нормальному закону распределения. Также не требуется задавать вес измерений.

Рассмотрим процесс математического моделирования на примере геодезической нивелирной сети рис. 1.

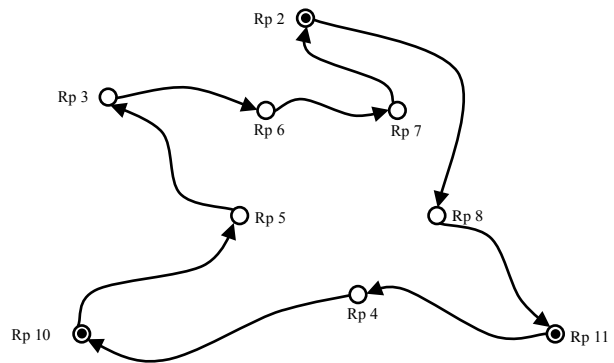


Рис. 1. Схема геодезической нивелирной сети: Rp ● – исходный репер; Rp ○ – определяемый репер

2. Уравниваем нивелирную сеть и получаем уравненные значения осадок. Показанная нивелирная сеть уравнивалась как свободное, так и нуль-свободное геодезическое построение. Математическую обработку нуль-свободной нивелирной сети выполняли различными методами: методом Lp-оценок и методом многокритериальной оптимизации (МК) [5]. Оба алгоритма уравнивания включали в себя получение отметок (осадок) реперов новым способом относительно средней плоскости и новым способом относительно исходных пунктов с учетом отметок исходных пунктов [6].

3. Из уравненных значений осадок берем среднее арифметическое по эпохам. Независимо от способа уравнивания и выбранного усло-

вия предлагаем брать среднее арифметическое осадок их эпох. Разумеется, что промежуток времени между эпохами зависит от интенсивности оседания или выпучивания реперов. При наличии осадок сооружений после критической эпохи должно наблюдаться увеличение значений осадок инженерного объекта. Для пояснения этого предлагаем формулу

$$L_{cp} = n_{cp} + \Delta_{cp}, \quad (1)$$

где  $L_{cp}$  – осадка сооружения средняя из эпох;  $n_{cp}$  – среднее из эпох значение осадок при их отсутствии;  $\Delta_{cp}$  – систематическая составляющая, характеризующая осадки сооружений.

Заметим, что при увеличении числа эпох  $n_{cp}$  стремятся к нулю, а  $\Delta_{cp}$  характеризует осадку сооружения в среднем из эпох и как систематическая часть никогда не будет равна нулю при увеличении числа эпох. Откуда видно, что с увеличением числа эпох  $L_{cp} \rightarrow \Delta_{cp}$ . Отметим, что обычно в обработку не брали  $L_{cp}$  из эпох для анализа осадок инженерных сооружений и тестирования нивелирных сетей.

Математическое моделирование предполагало два варианта обработки и анализа нивелирной сети.

В первом случае нивелирная сеть обрабатывалась как нуль-свободное геодезическое построение методом Lp-оценок со следующими показателями степени:  $n = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ . На гистограмме (рис. 2) приведены максимальные средние значения осадок реперов по каждой эпохе, полученные в результате уравнивания сети методом наименьших степеней.

Во втором случае уравнивание нивелирной сети выполнялось методом многокритериальной оптимизации. Нивелирная сеть включалась в математическую обработку как нуль-свободное, так и свободное геодезическое построение.

Результаты тестирования, а также уравнивания нуль-свободной и свободной нивелирной сети методом многокритериальной оптимизации представим в графическом виде (рис. 3).

Значения сгенерированных программой разностей превышений  $\delta H$  и индивидуальных показателей степени  $n$  при уравнивании МК приведены в табл. 1.

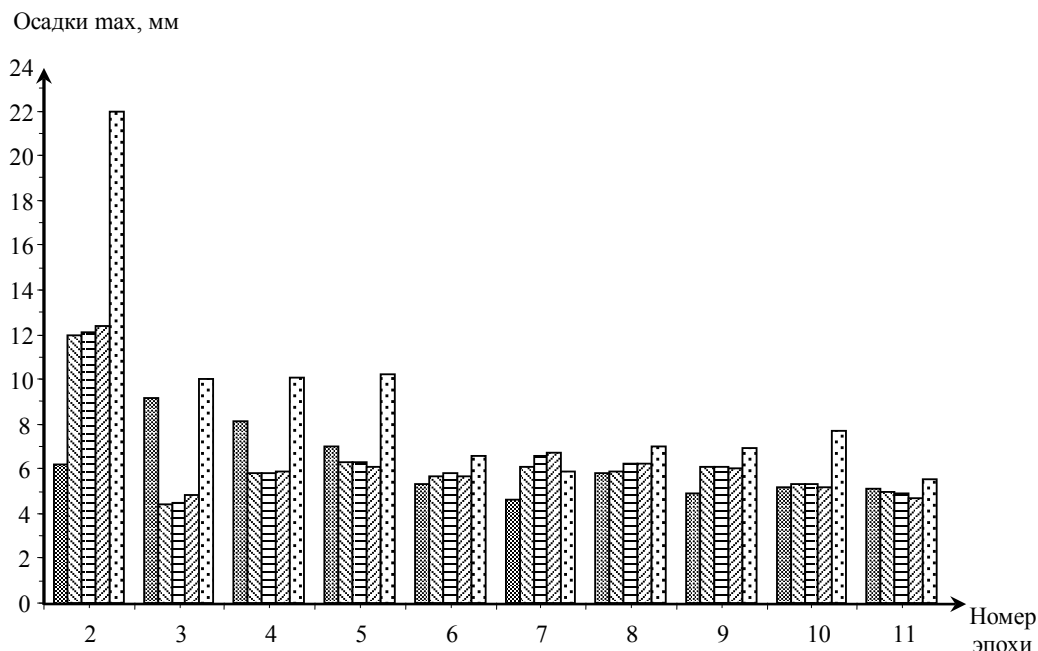


Рис. 2. Результаты уравнивания сети методом Lp-оценок: ■ –  $n = 1,0$ ; ▨ –  $n = 1,5$ ; ▩ –  $n = 2,0$ ; ▪ –  $n = 2,5$ ; ▫ –  $n = 3,0$

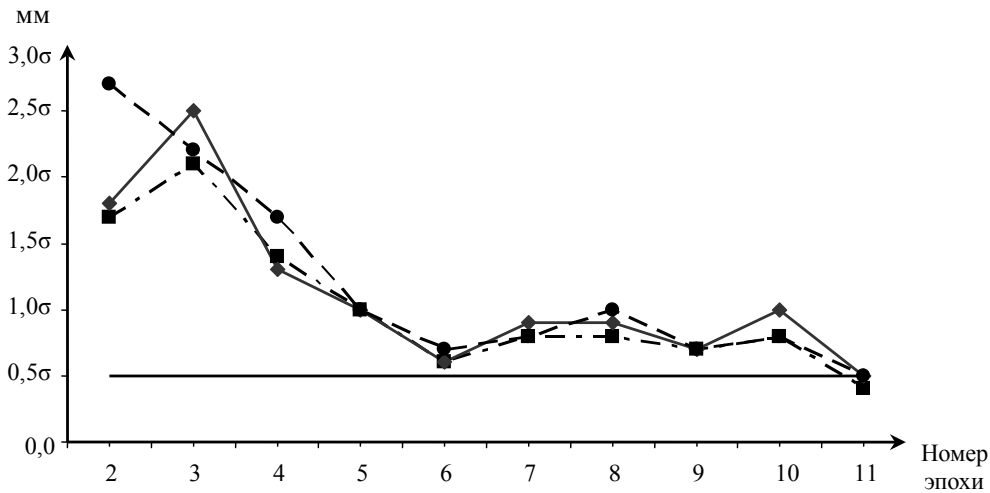


Рис. 3. Результаты уравнивания сети методом многокритериальной оптимизации: —■— — сеть относительно средней плоскости; —◆— — сеть относительно исходных пунктов; —●— — свободная сеть; — — линия симметричного размаха осадочных величин, принятая равной 0,5σ

Таблица 1

Разность превышений и индивидуальные показатели степени при уравнивании сети методом многокритериальной оптимизации

№ п/п	№ нач. Рр	№ кон. Рр	Эпоха 2		Эпоха 3		Эпоха 4		Эпоха 5		Эпоха 6		Эпоха 7		Эпоха 8		Эпоха 9		Эпоха 10		Эпоха 11	
			δH, м	n	δH, м	n	δH, м	n	δH, м	n	δH, м	n	δH, м	n	δH, м	n	δH, м	n	δH, м	n	δH, м	n
1	2	8	0,0007	2,0	0,0004	2,2	-0,0002	2,0	0,0008	2,2	0,0003	2,2	0,0020	2,2	0,0008	1,9	-0,0007	2,1	-0,0002	2,0	0,0003	1,9
2	8	11	-0,0010	2,0	0,0026	2,0	-0,0014	1,9	-0,0021	2,0	-0,0008	2,0	-0,0008	2,0	0,0011	1,9	-0,0008	2,1	-0,0002	2,0	0,0019	1,9
3	11	4	0,0009	1,9	-0,0004	2,2	0,0021	1,7	-0,0001	2,2	0,0017	2,3	-0,0001	2,2	0,0013	1,9	0,0015	2,2	0,0002	2,1	0,0008	2,0
4	4	10	-0,0016	2,0	-0,0018	2,1	0,0004	1,9	0,0012	2,1	0,0018	2,1	-0,0015	2,1	-0,0010	1,9	-0,0004	2,1	0,0037	2,0	-0,0001	1,9
5	10	5	-0,0025	2,0	-0,0002	2,1	0,0004	1,9	0,0027	2,1	-0,0022	2,1	0,0020	2,1	0,0004	2,0	0,0025	2,1	-0,0015	2,0	0,0018	1,9
6	5	3	-0,0001	2,0	-0,0026	2,1	0,0004	1,9	-0,0003	2,1	0,0017	2,1	-0,0013	2,1	-0,0013	1,9	0,0022	2,1	0,0000	2,0	0,0020	1,9
7	3	6	-0,0013	2,0	0,0008	2,1	-0,0014	1,9	-0,0013	2,1	0,0001	2,2	-0,0003	2,1	-0,0017	2,0	-0,0011	2,1	0,0004	2,0	0,0027	1,9
8	6	7	0,0008	2,0	0,0012	2,1	-0,0013	2,0	0,0011	2,1	-0,0008	2,1	0,0017	2,1	-0,0009	2,0	0,0012	2,1	0,0035	2,0	-0,0008	2,0
9	7	2	-0,0025	2,3	0,0027	1,9	0,0002	2,2	0,0006	1,9	-0,0006	1,9	0,0014	1,9	-0,0004	2,1	-0,0005	1,9	0,0016	1,8	0,0033	2,1

### ВЫВОДЫ

1. Уравнивание нуль-свободного геодезического построения методом Lp-оценок показало, что при показателях степени  $n = 1,5$  и  $2,5$  получаются практически такие же результаты, как и при  $n = 2,0$ . Результаты, полученные при  $n = 1,0$  и  $3,0$ , значительно отличаются от результатов при показателе степени  $n = 2,0$ .

Очевидно, для математической обработки данной нивелирной сети следует отдать предпочтение методу наименьших квадратов, так как сгенерированные разности превышений подчиняются нормальному закону распределе-

ния. Но при характере распределения ошибок, отличном от нормального, метод наименьших степеней будет давать лучшие результаты, чем МНК.

2. Метод многокритериальной оптимизации позволяет отыскать индивидуальный показатель степени для каждого отдельного измерения и выполнить уравнивание с учетом оптимального значения степени.

Из графиков рис. 3 видно, что способы уравнивания нуль-свободной нивелирной сети – метод «относительно средней плоскости» и новый метод «относительно исходных пунктов» дают близкие результаты и могут быть

использованы для обработки сетей как независимо, так и совместно.

Отметим, что многокритериальный метод для данной свободной нивелирной сети дает практически такие же результаты, как и для нуль-свободного построения, но оценка точности для свободной сети в 1,5–2,0 раза больше.

3. На рис. 3 видно, что графики уравненных значений осадок (независимо от способа математической обработки) находятся выше линии заданного критерия точности получения осадок, что свидетельствует о непригодности использования представленного геометрического построения (рис. 1) для получения достоверной информации о деформационных процессах. Как один из вариантов решения данной проблемы – усиление геометрии нивелирной сети дополнительными построениями (рис. 4).

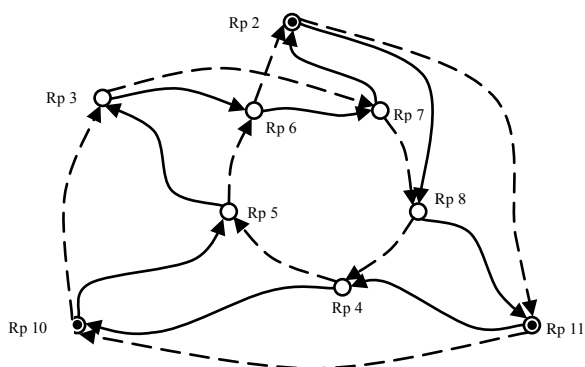


Рис. 4. Схема геодезической нивелирной сети с дополнительными измерениями: Rp ● – исходный репер; Rp ○ – определяемый репер; —→ – дополнительные измерения

Использование дополнительных построений приводит к появлению избыточных измерений, которые в свою очередь улучшают надежность наблюдений и повышают качество получения осадок из математической обработки сети.

4. Независимо от способа уравнивания и выбранного условия предлагаем брать за окончательный результат среднее арифметическое осадок их эпох, так как среднее арифметическое «уничтожает» случайные ошибки измерений, и в итоге получаем «чистые» осадки наблюдаемого инженерного объекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сухин, В. В. Слепая вера или постоянный контроль? Система мониторинга зданий и сооружения / В. В. Сухин // Технологии безопасности & инженерные системы. – 2005. – № 2. – С. 36–39.
2. Геодезические методы измерения вертикальных смещений и анализ устойчивости реперов / В. И. Ганьшин [и др]; под общ. ред. В. И. Ганьшина. – М.: Недра, 1991. – 272 с.
3. Пискунов, М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений / М. Е. Пискунов. – М.: Недра, 1980. – 248 с.
4. Жуков, Б. Н. Предложение о создании единой инструкции по нивелированию для инженерно-геодезических работ / Б. Н. Жуков, Н. Б. Жуков // Геодезия и картография. – 1998. – № 8. – С. 22–26.
5. Волжанин, С. Д. Уравнивание геодезических сетей методом Лр-оценок / С. Д. Волжанин // Геодезия, картография и аэросъемка: сб. науч. тр. – Львов, 1984. – Вып. 40. – С. 20–23.
6. Усов, Д. В. Уравнивание нивелирных сетей методами Лр-оценок и многокритериальной оптимизации с целью определения осадок сооружений / Д. В. Усов // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф: Прикладные науки. Строительство. – 2007. – № 12. – С. 135–142.

Поступила 08.08.2008