

*Старостина О.В. кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры «Геодезия и картография»
Карагандинский технический университет
Казахстан, г. Караганда
Кожухов К.Д.
Магистрант
2 курс, факультет «Маркшейдерское дело и геодезия»
Карагандинский технический университет
Казахстан, г. Караганда*

ПОСТРОЕНИЕ ОПОРНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ И ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗА ОСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСНОВАНИЯХ ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье рассматривается методика построения опорной геодезической сети и геодинамического полигона для мониторинга осадочных процессов в основаниях зданий. Проведены GNSS-измерения с использованием оборудования EFT M4, выполнено уравнивание координат методом наименьших квадратов, рассчитаны невязки и выполнена оценка точности сети. Представлены поправки на каждую точку. Полученные результаты подтверждают высокую точность выполненных работ и возможность последующего мониторинга деформаций исследуемого объекта.

Annotation. The article discusses a technique for constructing a reference geodetic network and a geodynamic polygon for monitoring sedimentary processes in the foundations of buildings. GNSS measurements were performed using EFT M4 equipment, coordinates were equalized using the least squares method, discrepancies were calculated, and network accuracy was evaluated. Corrections for each point are presented. The results obtained confirm the high accuracy of the work performed and the possibility of subsequent monitoring of deformations of the object under study.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, осадка фундамента, опорная сеть, геодинамический полигон, GNSS-наблюдения, тахеометрия.

Keywords: geodetic monitoring, foundation settlement, control network, geodynamic polygon, GNSS observations, total station measurements.

Введение

В современных условиях интенсивной урбанизации и повышения нагрузок на основания зданий особое значение приобретают инженерно-геодезические методы мониторинга деформаций. Геодезический контроль позволяет своевременно выявить опасные смещения и осадки, что критично для безопасности эксплуатации зданий.

Целью данного исследования является построение точной и устойчивой опорной геодезической сети, создание геодинамического полигона и проведение первичных GNSS-измерений на примере 26-этажного жилого здания.

В качестве основного оборудования использован комплект двухчастотных GNSS-приёмников EFT M4, способных работать с системами GPS, GLONASS, Galileo и BeiDou. Измерения выполнены в статическом режиме для достижения наивысшей точности.

Основные параметры измерений:

- 1) Ровер: перемещаемый по точкам RP2–RP11;
- 2) Время съёмки: от 20 до 45 минут;
- 3) Интервал записи: 5 с;
- 4) Маска по высоте: $\geq 15^\circ$;
- 5) Высота антенны: фиксировалась индивидуально;
- 6) Формат: RINEX;

Условия: преимущественно утренние/вечерние часы, фиксация помех, затенения и вибраций.

Для обработки и уравнивания данных использовались программные комплексы «Trimble Business Center» и «Leica Infinity».

Построение опорной сети

На основе координат, полученных в результате GNSS-измерений, выполнена первичная проверка точности и замыкания сети. Проектные координаты были заданы согласно таблице №1, измеренные координаты

представлены в таблице №2. Расчёт невязок и поправок проведён по формулам:

Поправки координат:

$$\Delta X = X_{\text{изм}} - X_{\text{теор}} ; \Delta Y = Y_{\text{изм}} - Y_{\text{теор}};$$

Линейная невязка:

$$f = \sqrt{(\sum \Delta X)^2 + (\sum \Delta Y)^2}$$

Среднеквадратическая ошибка на сторону:

$$m = \frac{f}{\sqrt{n}}$$

Пример расчётов:

$$\sum \Delta X^2 = -0,0001 \text{ м}; \sum \Delta Y^2 = -0,0086 \text{ м}$$

$$f = \sqrt{(-0,0001)^2 + (-0,0086)^2} = 0,0086; m = \frac{0,0086}{\sqrt{11}} = 0,0026 \text{ м}$$

Погрешности по каждой точке не превышают 0.0260 м (см. Таблица №3), что соответствует допускам для инженерно-геодезических задач.

Уравнивание координат выполнено методом наименьших квадратов:

$$\min \sum v_i^2$$

Где v_i - поправка, вносимая в i -е измерение. Результатом уравнивания стало уточнение координат всех пунктов и исключение случайных ошибок. Полученные остаточные поправки представлены в таблице 4 и варьируются в пределах ± 0.018 м, что говорит о высокой точности внутреннего согласования сети.

Таблица №1

Проектные координаты углов основания зданий

Имя точки	Xпроект	Yпроект	Zпроект
-----------	---------	---------	---------

Z1	116810,4213	43904,2008	119,8
Z2	116810,4213	43918,8969	119,8
Z3	116803,4213	43918,8969	119,8
Z4	116804,2203	43920,2809	119,8
Z5	116802,9213	43921,0309	119,8
Z6	116804,9213	43924,495	119,8
Z7	116794,962	43930,245	119,8
Z8	116789,212	43920,2857	119,8
Z9	116777,712	43919,2989	119,8
Z10	116777,712	43907,7989	119,8
Z11	116789,212	43906,812	119,8
Z12	116794,962	43896,8527	119,8
Z13	116804,9213	43902,6027	119,8
Z14	116802,9213	43906,0668	119,8
Z15	116804,2203	43906,8168	119,8
Z16	116803,4213	43908,2008	119,8
Z17	116807,4213	43908,2008	119,8
Z18	116807,4213	43904,2008	119,8

Таблица №2

Фактические значения после измерений

Имя точки	Xфакт	Yфакт	Zфакт
Z1	116810.4175	43904.1988	119.798
Z2	116810.4348	43918.8906	119.796
Z3	116803.4283	43918.9003	119.802
Z4	116804.2233	43920.2701	119.799
Z5	116802.911	43921.0247	119.7962
Z6	116804.911	43924.491	119.8
Z7	116794.9487	43930.2437	119.7953
Z8	116789.223	43920.2943	119.804
Z9	116777.715	43919.2899	119.7976
Z10	116777.7182	43907.7993	119.8016
Z11	116789.1976	43906.8148	119.798
Z12	116794.9761	43896.8391	119.8002
Z13	116804.9313	43902.6059	119.8005
Z14	116802.9127	43906.0569	119.797
Z15	116804.2108	43906.8038	119.8047
Z16	116803.4118	43908.2143	119.8028
Z17	116807.4154	43908.2148	119.8044
Z18	116807.422	43904.2101	119.8039

Таблица №3

Поправки на каждый пункт

Имя точки	ΔX	ΔY	ΔZ
Z1	-0.0038	-0.002	-0.002
Z2	0.0135	-0.0063	-0.004
Z3	0.007	0.0034	0.0018
Z4	0.003	-0.0108	-0.0006
Z5	-0.0103	-0.0062	-0.0038
Z6	-0.0103	-0.004	-0.0
Z7	-0.0133	-0.0013	-0.0047
Z8	0.011	0.0086	0.0041
Z9	0.003	-0.009	-0.0024
Z10	0.0062	0.0004	0.0016
Z11	-0.0144	0.0028	-0.0019
Z12	0.0141	-0.0136	0.0002
Z13	0.01	0.0032	0.0005
Z14	-0.0086	-0.0099	-0.0032
Z15	-0.0095	-0.013	0.0047
Z16	-0.0095	0.0135	0.0028
Z17	-0.0059	0.014	0.0044
Z18	0.0007	0.0093	0.0039

Геодинамический полигон

Для обеспечения пространственного контроля осадочных процессов и деформаций оснований исследуемого здания дополнительно был сформирован геодинамический полигон, включающий 8 точек наблюдения (Таблица 4). Точки полигона равномерно распределены вокруг исследуемого объекта и обеспечивают охват всей критически важной зоны влияния (Рисунок 1).

Таблица №4

Координаты пунктов геодезического полигона

Точка	X	Y	Z
G1	116779.816	44070.2857	119.5232
G2	116869.4634	43752.4075	119.4656
G3	116653.2334	44036.4705	119.5101
G4	116913.229	43698.2338	119.547
G5	116962.9771	43774.9356	119.4682
G6	116703.3618	43811.6969	119.5025
G7	116802.778	43806.4917	119.5112
G8	116685.7975	43806.8579	119.4866

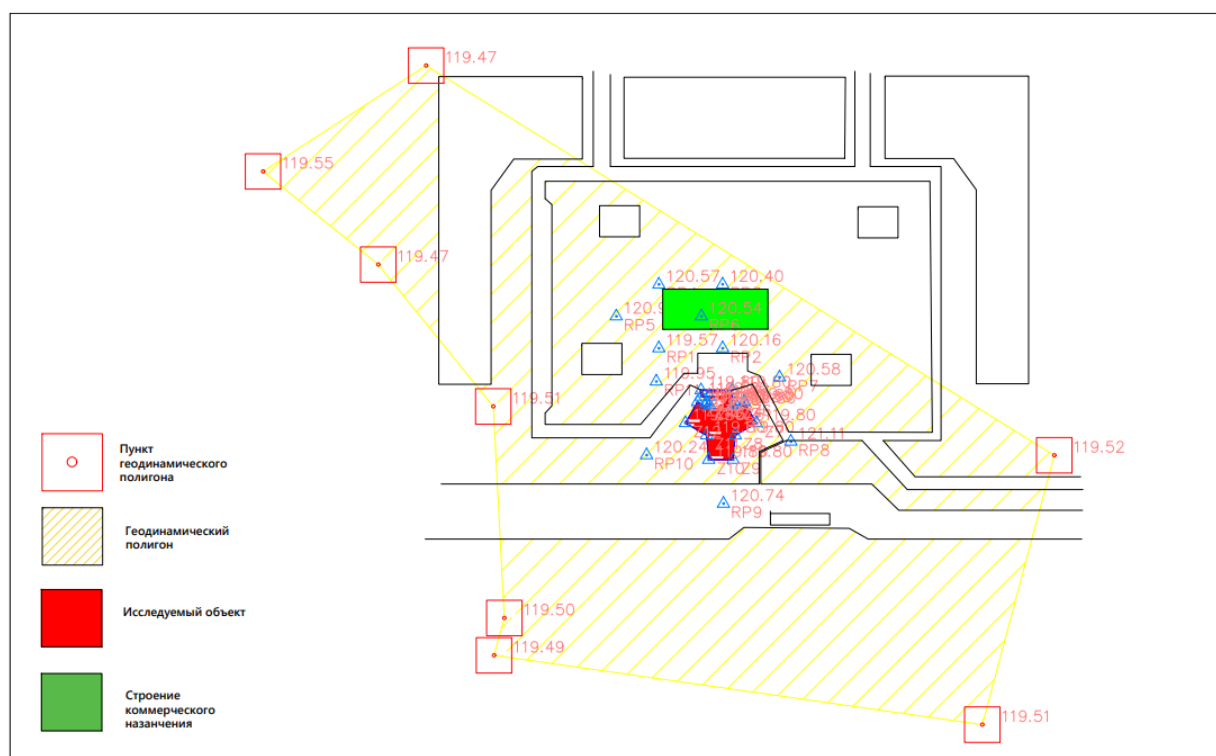


Рисунок 1 - План местности с отображением геодезического полигона

Цели построения геодезического полигона:

- 1) Фиксация деформаций и осадок, происходящих в основании здания;
- 2) Регистрация пространственных смещений грунта;

3) Обеспечение возможности выполнения регулярного мониторинга состояния территории;

4) Контроль сезонных и техногенных изменений.

Характеристики точек полигона. Все пункты (G1–G8) имеют определённые координаты в условной системе и привязку по высоте. Высотные отметки колеблются от 119.4656 м до 119.5470 м, что свидетельствует о слабонаклонной местности. Горизонтальные координаты обеспечивают покрытие исследуемой зоны с запасом, позволяя интерпретировать возможные осадки как в продольном, так и в поперечном направлении.

Практическое значение. Построение геодинимического полигона в составе опорной геодезической сети позволяет вести двухуровневый мониторинг:

- 1) Геометрическая стабильность опорных точек (RP1–RP11);
- 2) Физическое поведение основания в зоне сооружения (G1–G8).

Совокупное использование этих данных даёт возможность интерпретировать осадочные процессы с максимальной точностью.

Анализ смещений

В результате сравнения проектных координат углов основания здания с фактически измеренными значениями, полученными в ходе GNSS-измерений и тахеометрических наблюдений, были выявлены смещения по плановым координатам (X и Y), а также по высоте (Z). Максимальные отклонения по координатам достигали:

- по X: ± 0.0187 м
- по Y: ± 0.0149 м
- по Z (осадка): ± 0.0049 м

Построенное векторное поле смещений наглядно демонстрирует, что отклонения точек носят неравномерный характер. В ряде случаев наблюдаются смещения в разные стороны, что может свидетельствовать, о неоднородности основания, о локальных деформациях конструктивных

элементов фундамента, о влиянии внешних факторов (транспортные нагрузки, сезонное изменение уровня грунтовых вод и т.д.).

Особо следует отметить, что даже при малых абсолютных значениях, систематические смещения в одном направлении (например, на юго-запад) могут указывать на начало развития крена здания или осадки определённого участка фундамента.

Вывод

В результате высокоточных измерений определены смещения углов основания здания в пределах до 2 см, что находится в пределах допустимого, но требует дальнейшего наблюдения.

Распределение векторов смещений подтверждает наличие локальных участков осадочных процессов, особенно на участках с максимальными отклонениями вектора.

Горизонтальные смещения являются преобладающими по сравнению с вертикальными, что указывает на влияние боковых сил или неоднородных нагрузок на основание.

Установленная точность GNSS-съёмки и проведённое уравнивание опорной сети позволяют использовать полученные данные в качестве базовой модели для регулярного мониторинга.

Рекомендации

Необходимо продолжить мониторинг за деформациями на основе разработанного геодинимического полигона, используя периодичность наблюдений не реже одного раза в квартал. Также следует включить тахеометрические измерения по маркам на конструкциях здания для анализа крена и перекосов.

При дальнейшем развитии смещений ($> \pm 0.02$ м) рекомендовано провести инженерно-геологическое обследование основания.

Обновлять и уравнивать координаты точек не реже, чем после каждого цикла измерений.

Заключение

В ходе работы была разработана и реализована методика построения опорной геодезической сети и геодинамического полигона для наблюдения за осадочными процессами в основании 26-этажного здания. Проведены высокоточные GNSS-измерения с применением оборудования EFT M4 в статическом режиме. После получения координат выполнен анализ точности и внутренней согласованности сети, проведено уравнивание координат методом наименьших квадратов.

Важным этапом стало формирование геодинамического полигона из восьми точек, обеспечивающего надежный охват зоны возможных деформаций. Анализ смещений проектных точек основания здания показал наличие отклонений, находящихся в пределах допустимого, однако требующих постоянного наблюдения и анализа.

Полученные результаты подтверждают, что разработанная система мониторинга обладает высокой точностью, устойчивостью к помехам и пригодна для долгосрочного наблюдения за деформациями фундаментов и оснований зданий. Методика может быть успешно масштабирована для других объектов аналогичного назначения и уровня ответственности.

Использованные источники

- 1.Афанасьев В.Н. Геодезическое обеспечение мониторинга инженерных сооружений. — М.: Недра, 2019.
- 2.Буров С.В. Основы GNSS-измерений в инженерных изысканиях. — Новосибирск: СибГИУ, 2020.
- 3.Мурашев А.А. Прикладная геодезия в строительстве. — Екатеринбург: УрФУ, 2022.
4. Сборник нормативных документов по геодезическим работам при строительстве и эксплуатации зданий. — Алматы: КазНИИСА, 2021.