

Е. И. Аврунев^{1✉}, М. И. Коваленко¹

Математическая обработка результатов геодезических измерений при определении параметров деформаций объектов недвижимости

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: avrunev-ei@yandex.ru

Аннотация. Определение параметров пространственного смещения объектов недвижимости является важной задачей ряда сфер деятельности, таких как землеустройство, кадастр, градостроительство, геодезия и других смежных сфер деятельности. Точность и надежность определения параметров деформационных процессов объектов недвижимости зависит, как от характера деформационного процесса, так и от точности запроектированной геодезической сети для мониторинга. В связи с чем встает вопрос определения значимости пространственного смещения и подхода к математической обработке результатов геодезических измерений. Целью настоящей статьи является исследование методики математической обработки результатов геодезического мониторинга объектов недвижимости. Рассматриваются факторы, оказывающие влияние на точность определения математической модели деформационного процесса объекта недвижимости, алгоритм математической обработки результатов геодезических измерений, а также предлагается подход для проверки достоверности построенной математической модели деформационного процесса.

Ключевые слова: объект недвижимости, мониторинг, деформационный процесс, деформационный знак, геодезическая сеть, математическая обработка

E. I. Avrunev^{1✉}, M. I. Kovalenko¹

Mathematical processing of geodetic measurement results in determining the deformation parameters of real estate objects

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: avrunev-ei@yandex.ru

Abstract. Determining the parameters of spatial displacement of real estate objects is an important task of a number of fields of activity, such as land management, cadaster, urban planning, geodesy and other related fields of activity. The accuracy and reliability of determining the parameters of deformation processes of real estate depends both on the nature of the deformation process and on the accuracy of the designed geodetic network for monitoring. In this regard, the question arises of determining the significance of spatial displacement and the approach to mathematical processing of the results of geodetic measurements. The purpose of this article is to study the methodology of mathematical processing of the results of geodetic monitoring of real estate objects. The factors influencing the accuracy of determining the mathematical model of the deformation process of a real estate object, the algorithm for mathematical processing of the results of geodetic measurements, and an approach to checking the reliability of the constructed mathematical model of the deformation process are considered.

Keywords: real estate object, monitoring, deformation process, deformation sign, geodetic network, mathematical processing

Введение

В настоящее время к объектам, в отношении которых выполняется геодезический мониторинг, относятся как объекты капитального строительства, так и земельные участки, находящиеся в определенных территориальных образованиях. Мониторинг данных объектов недвижимости (ОН) осуществляется с целью определения их пространственного положения с дальнейшим анализом на предмет их деформации и возможного нарушения стабильности в пространстве, приводящее к полному разрушению объекта [1 - 4, 6 - 11]. Разрушению особенно подвержены объекты, расположенные в зонах с высоким залеганием грунтовых вод, из-за наличия риска возникновения оползневых процессов или вдоль береговой линии, где под влиянием природных условий и антропогенных факторов возможно ускорение деформационных процессов [6, 7].

Изучение территорий, подверженных оползневому или другим деформационным процессам, осуществляется посредством наблюдения за деформационными знаками (ДЗ), являющихся структурными элементами геодезической сети специального назначения и закладываемые в тело объекта в отношении которого осуществляется деформационный мониторинг [1, 2, 5, 8].

Методы и материалы

Для оценки значимости пространственного смещения объекта наблюдений, необходимо определить с какой скоростью происходит движение объекта. Решить поставленную задачу возможно выполнив геодезические измерения с целью определения местоположения деформационного знака А (рис. 1) в пространстве (x, y, H) относительно знака, который не подвержен влиянию деформационных процессов через определенные интервалы времени (Δt).

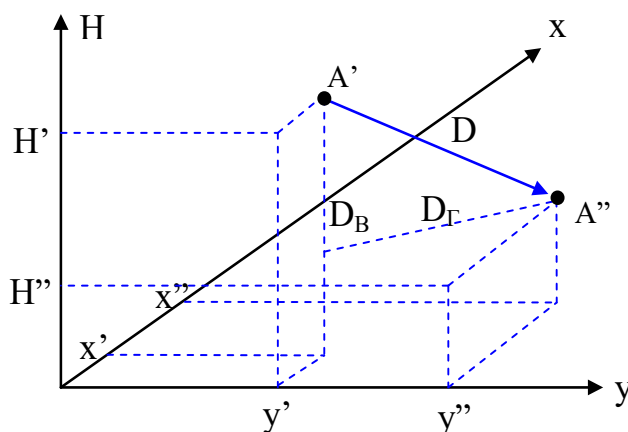


Рис. 1. Движение деформационного знака в пространственной системе координат.

Условные обозначения: А' положение деформационного знака в момент времени t_1 ;
А'' положение деформационного знака в момент времени t_2 .

Расстояние (D), на которое сместится ДЗ за интервал времени Δt , может быть вычислено по следующей формуле:

$$D = \sqrt{D_G^2 + D_B^2} = \sqrt{(x_A'' - x_A')^2 + (y_A'' - y_A')^2 + (H_A'' - H_A')^2}, \quad (1)$$

где D_G , D_B – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющая движения в пространстве деформационного знака.

Скорость движения деформационного знака вычисляется по следующей формуле:

$$V_A = \frac{D}{\Delta t} = \sqrt{\frac{D_G^2 + D_B^2}{\Delta t^2}}; V_A = \sqrt{V_G^2 + V_B^2}, \quad (2)$$

где V_G , V_B – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющая полной скорости движения деформационного знака А.

Направление вектора движения вычисляется по формуле:

$$\alpha = \arctg \frac{y_A'' - y_A'}{x_A'' - x_A'}. \quad (3)$$

Для определения движения ДЗ на местности, подверженной деформационным процессам, необходимо построить специальную геодезическую сеть относительно знаков которой определять соответствующие параметры (1, 2, 3), а затем на основании этих параметров строить математическую модель состояния в пространстве объекта.

При проектировании специальной геодезической сети для мониторинга динамических процессов необходимо также обеспечить достоверность математической модели развития деформационного процесса. Для этого вычисляются дополнительные параметры такие как статистический критерий для определения значимости движения D_{MIN} и интервал времени Δt между циклами геодезических измерений призванные обеспечить достоверность математической модели.

Результаты

Для решения поставленной задачи использовался статистический критерий, предложенный в работе [1]:

$$D_G \geq D_{MIN} = t \cdot \sqrt{2} \cdot m_p \cdot \sqrt{(\cos \alpha^2 \cdot Q_{X_i} + \sin \alpha^2 \cdot Q_{X_i})}, \quad (4)$$

где D_{MIN} – движение деформационного знака, которое может быть обнаружено при математической обработке геодезической сети, превосходящее влияние случайных ошибок геодезических измерений;

t – статистический коэффициент, зависящий от доверительной вероятности оценивания значимости движения, при $\beta = 95 \%$ он принимается равным $t = 2$;

α – дирекционный угол движения деформационного знака, который априорно задается на этапе проектирования, а затем уточняется по результатам математической обработки результатов вычислений (в качестве примера он задан $\alpha=45^\circ$);

Q_{Xi} , Q_{Yi} – весовые коэффициенты деформационного знака, соответствующие наиболее слабому знаку геодезической сети.

Статистический критерий для определения значимости движения в вертикальной плоскости:

$$D_B \geq D_{MIN} = t \cdot \sqrt{2} \cdot m_{h_{1\text{км}}} \cdot \sqrt{Q_{H_i}}, \quad (5)$$

где Q_{H_i} – максимальный диагональный элемент, соответствующий наиболее слабому деформационному знаку.

Важнейшим аспектом при осуществлении мониторинга динамических процессов является определение научно-обоснованного интервала времени Δt между циклами наблюдений. Выбор некорректного интервала времени исказит математическую модель вследствие чего будут сделаны ошибочные выводы относительно наблюдаемого деформационного процесса.

Вычисление интервала времени Δt между циклами наблюдений в СГС рекомендуется выполнять в зависимости от скорости развития динамического процесса и точности вычисления координат деформационного знака в наиболее слабом месте [1]:

$$\Delta t_r = \frac{\sqrt{2} \cdot m_b \cdot \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot Q_x + \sin^2 \alpha \cdot Q_y}}{\sqrt{0,11} \cdot V_r}, \quad (6)$$

$$\Delta t_B = \frac{\sqrt{2} \cdot m_h \cdot \sqrt{Q_H}}{\sqrt{0,11} \cdot V_B}, \quad (7)$$

где V_r – априорно заданная скорость движения деформационного знака в горизонтальной плоскости.

V_B – априорно заданная скорость движения оползня в вертикальной плоскости.

При условии, что значимость движения деформационных знаков превышает погрешность определения координат, необходимо построение математической модели движения контролируемого ОН.

Математическая модель движения в пространстве контролируемого объекта недвижимости будет состоять из n – деформационных знаков, заложенных в его тело. В общем, самом простом варианте, уравнение, которое описывает линейное движение в пространстве ОН, будет представлено следующим образом:

$$\begin{bmatrix} y_1^{t_1} = a_1 \cdot X_1 + b_1 \\ \dots\dots\dots \\ y_n^{t_1} = a_n \cdot X_n + b_n \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y_1^{t_2} = a_1 \cdot X_1 + b_1 \\ \dots\dots\dots \\ y_n^{t_2} = a_n \cdot X_n + b_n \end{bmatrix}, \dots\dots\dots \begin{bmatrix} y_1^{t_m} = a_1 \cdot X_1 + b_1 \\ \dots\dots\dots \\ y_n^{t_m} = a_n \cdot X_n + b_n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$y_{cp}^{t_1} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{t_1}}{n}, \quad y_{cp}^{t_2} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{t_2}}{n}, \quad \dots\dots\dots y_{cp}^{t_m} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{t_m}}{n},$$

где a_i, b_i – коэффициенты уравнения линейной регрессии, X_i – вектор параметров, определенный для n деформационных знаков, в соответствующую эпоху геодезических наблюдений, m – число эпох геодезических наблюдений, y_{cp} – среднее значение параметра для соответствующей эпохи геодезических наблюдений, которое будет являться структурным элементом математической модели.

В том случае, когда деформационный процесс имеет затухающий характер уравнение регрессии будет представлено экспоненциальной зависимостью:

$$\begin{bmatrix} y_1^{t_1} = a_1^{x_1} + b_1 \\ \dots\dots\dots \\ y_n^{t_1} = a_n^{x_1} + b_n \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y_1^{t_2} = a_1^{x_1} + b_1 \\ \dots\dots\dots \\ y_n^{t_2} = a_n^{x_1} + b_n \end{bmatrix}, \dots\dots\dots \begin{bmatrix} y_1^{t_m} = a_1^{x_1} + b_1 \\ \dots\dots\dots \\ y_n^{t_m} = a_n^{x_1} + b_n \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$y_{cp}^{t_1} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{t_1}}{n}, \quad y_{cp}^{t_2} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{t_2}}{n}, \quad \dots\dots\dots y_{cp}^{t_m} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{t_m}}{n},$$

Необходимо отметить, что имеют место случаи, когда движение всех ДЗ, невозможно описать только одной зависимостью. Поэтому возникает ситуация, при которой объект наблюдений необходимо делить на блоки, каждый из которых описывается своим уравнением регрессии.

Заключение

Таким образом, резюмируя выполненные в этой статье теоретические исследования, сформулируем основные полученные результаты:

- 1) При проектировании геодезической сети специального назначения необходимо устанавливать интервал времени между циклами геодезических наблюдений с использованием уравнений (6, 7);
- 2) При математической обработке результатов измерений необходимо оценивать значимость вычисления параметров деформационного процесса с использованием уравнений (4, 5);
- 3) Построение математической модели деформационного процесса выполнять только при условии значимости его параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аврунев Е.И. Геодезическое обеспечение кадастровых работ / Текст: монография // Е.И. Аврунев, С.Р. Горобцов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2021. – 209 с.
2. Аврунев Е.И. Изучение состояния земной поверхности локального земельного участка при осуществлении мониторинга земель : практикум / Е. И. Аврунев, И. А. Гиниятов, А. Л. Ильиных ;

- СГУГиТ. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 109 с. – ISBN 978-5-87693-880-0 : – Текст : непосредственный.
3. Анисимова Н. Г. Экзогенные геологические опасности. : монография. – М.: КРУК, 2002. – 348 с.
4. Господинов С.Г. Геодезическое обеспечение цифрового моделирования / Господинов С.Г. – Текст : непосредственный.//Образовательные ресурсы и технологии. – 2016 – вып. 4 (16). – С. 121–130.
5. ГОСТ Р 53864-2010. Сети геодезические спутниковые. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации ; введен 10.09.2010. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 6 с. – (Глобальная навигационная спутниковая система). – Текст : непосредственный.
6. Осипов, В.И. Природные катастрофы и устойчивое развитие / В.И. Осипов // Геоэкология. – 1997. – № 2. – С. 5-18.
7. Осипов, В.И. Природные катастрофы на рубеже XXI века / В.И. Осипов // Вестник Российской Академии наук. М. : 2001, том 71, - № 4 – С. 291-302
8. Р 52.24.788-2013 Организация и ведение мониторинга водных объектов за состоянием дна, берегов, изменениями морфометрических особенностей, состоянием и режимом использования водоохраных зон, водохозяйственных систем и гидротехнических сооружений : РЕКОМЕНДАЦИИ ; введен 11.02.2013. – Ростов-на Дону: Росгидромет, ФГБУ "ГХИ", 2013. – 36 с. – Текст : непосредственный.
9. Симонян, В.В. Роль геодезических методов в изучении динамики оползней /В.В Симонян, В.И. Волков // Журнал «Естественные и технические науки» 2021. №4. С. 193-195.
10. Соловицкий, А. Н. Новый этап развития геодезии – переход к изучению деформаций блоков земной коры в районах освоения угольных месторождений / А. Н. Соловицкий, А. П. Карпик, А. И. Каленицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 3–9.
11. Соловицкий, А.Н. О фундаментальной задаче геодинамики угольного месторождения при проведении геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Изв. вузов «Геодезия и аэрофото-съемка». 2021. Т. 65. № 2. С. 147–151. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-147-151.

© Е. И. Аврунев, М. И. Коваленко, 2026