

А.М. Хайлак, аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури

ЗАСТОСУВАННЯ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН РІВНОМІРНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ПРОТИЗСУВНИХ СПОРУД

У роботі наведено результати експериментальних досліджень горизонтальних переміщень протизсувних споруд. На прикладі результатів геодезичного моніторингу за переміщеннями протизсувної споруди досліджено ефективність застосування кластерного аналізу для визначення зон рівномірних переміщень. Викладено основи кластерного аналізу та алгоритм кластеризації. Наведено основні, найбільш ефективні методи кластеризації. Досліджено різні методи кластеризації за матеріалами геодезичного моніторингу підпірної стінки у м. Києві. В рамках кожного методу перевірено ефективність застосування різних методів визначення відстаней або мір схожості об'єктів. Для якісного аналізу до кожного з критеріїв в межах різних методів кластеризації побудовано дендрограми. В результаті аналізу для розгляданого об'єкта найбільш ефективними методами кластеризації визначено метод зв'язку віддалених точок та метод центроїдного зв'язку. Виявлено, що для кожного з цих методів результати кластеризації за різними мірами схожості є практично однаковими.

Ключові слова: *зсув, кластерний аналіз, методи кластеризації, міра схожості, горизонтальні переміщення, дендрограма.*

Вступ. Під час геодезичного моніторингу за будь-якими типами споруд або об'єктами досить часто виникає потреба у визначенні зон рівномірних переміщень. Цілком зрозуміло, що для дослідження переміщень єдина модель може бути використана лише в разі рівномірного переміщення всього об'єкта. Проте саме такий випадок не є ані типовим, ані таким, що спричинює значні руйнування інженерних споруд. Загалом відомо, що саме нерівномірні переміщення є найбільш небезпечними і найбільш поширеними. При цьому нерівномірність досить рідко має лінійний характер або виявляє певну закономірність. Найчастіше характер деформаційного процесу залежить від геологічної будови основи. У такому випадку вектори переміщень елементів споруди можуть мати в різних частинах різні напрямки, відрізнятися за величиною та мати циклічний характер. За таких умов на етапі побудови моделі прогнозування переміщень важливо визначити зони, у межах яких переміщення відбуваються за одним законом і до яких може бути застосована модель прогнозування з однаковими параметрами. У спостереженнях за зсувами, які завжди мають неоднорідно будову, визначення зон рівномірних переміщень є особливо актуальним [8; 11]. Поділ поверхні зсуву на зони дає можливість визначити зону зсуву та зону найбільш інтенсивного переміщення. Під час спостережень за протизсувними спорудами завдяки такому аналізу можна виявити ділянки споруди, що потребують першочергового підсилення [3].

Аналіз досліджень та публікацій. До теперішнього часу питання визначення зон рівномірних переміщень є недостатньо дослідженим. Найчастіше у прогнозуванні переміщень інженерних споруд визначають характерні марки, або знаки, і для кожної з них незалежно будують модель прогнозування [1; 4]. Зрозуміло, що такий підхід не дає змоги скласти повноцінну картину деформаційного процесу. Інший підхід базується на використанні практичного досвіду й аналогічному поділі споруди на рівномірні блоки. Обидва підходи не мають достатнього математичного обґрунтування, хоча застосування геоінформаційних технологій [10] може певним чином спростити процес ідентифікації. Оскільки маємо справу із результатами вимірювань, то для визначення зон рівномірних переміщень доцільно застосувати статистичні методи аналізу. Найпростіший підхід, що ґрунтується на використанні елементарних параметрів (середнє значення, дисперсія), розглянуто в роботі [9]. Запропонований аналіз є фактично удосконаленим варіантом візуального аналізу. Більш досконалий метод наведено в іншій роботі [7]. За результатами досліджень нами встановлено, що цей підхід не завжди дає змогу отримати адекватні результати. Зокрема, під час практичного дослідження результатів спостереження за осіданням споруди в Києві за допомогою цього методу не вдалося визначити зони рівномірних осідань, хоча їх наявність, за результатами спостережень, є очевидною. Серед статистичних методів, які можуть бути стійкими до похибок вимірювань і дають змогу варіювати велику кількість параметрів для досягнення потрібного результату, виділяється метод кластерного аналізу [6]. Спроби застосування цього методу аналізу наведено у роботах [2; 5]. Докладно метод кластерного аналізу для аналізу переміщень не досліджувався.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження можливостей методу кластерного аналізу для визначення зон рівномірних переміщень під час геодезичного моніторингу.

Основна частина. Для виконання запропонованого нами дослідження наведемо опис об'єкта дослідження. Як об'єкт використаємо систему протизсувних стінок, зведених для захисту торговельного комплексу на вул. Саперно-Слобідській у Києві. Загальний вигляд системи протизсувних споруд наведено на рис. 1.

Загальна висота зсувного пагорба перевищує 30 м. Для утримання пагорба запроектовано та зведено чотири підпірних стіни (ПС-1, ПС-2, ПС-3, ПС-4). Висота підпірних стін становить від 8 до 14 м. Всі стіни мають пальові фундаменти. Глибина занурення паль – 30 м (рис. 2).

Для спостережень за переміщеннями створено просторову геодезичну мережу з п'ятьох пунктів для подвійного координування деформаційних знаків на підпірних стінах. За результатами вирівнювання пункти мережі були визначені із середніми квадратичними похибками: $m_x = 1,5$ мм, $m_y = 3$ мм, $m_z = 4$ мм. Головною вимогою було визначення переміщень у напрямку осі x з СКП 3 мм. Для інших осей точність визначення переміщень не є такою критичною і не впливає на надійність визначення стабільності підпірних стін. Вимірювання виконувались щотижня протягом шести місяців. Загальна кількість циклів спостережень дорівнює 27.



Рис. 1. Загальний вигляд системи підпірних стін

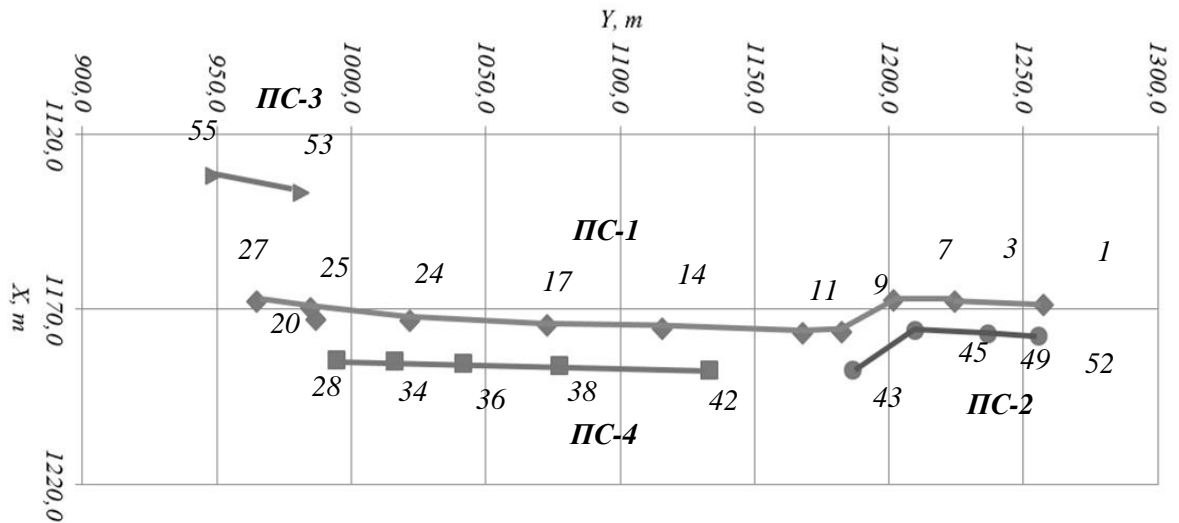


Рис. 2. Розміщення деформаційних марок на підпірних стінах

За результатами спостережень переміщення у напрямку осі X досягли 40 мм для підпірної стіни ПС-2, яка рухається окремо від інших стін. У напрямку координатних осей Y і Z максимальні переміщення не перевищували 5-8 мм. Такі переміщення є абсолютно не критичними, тому весь подальший аналіз виконаємо тільки для горизонтальних переміщень по осі X . Найбільш критичними горизонтальні переміщення є для підпірної стіни ПС-1.

На рис. 3 наведено графік переміщень марок для підпірної стіни ПС-3 після останнього циклу спостережень.

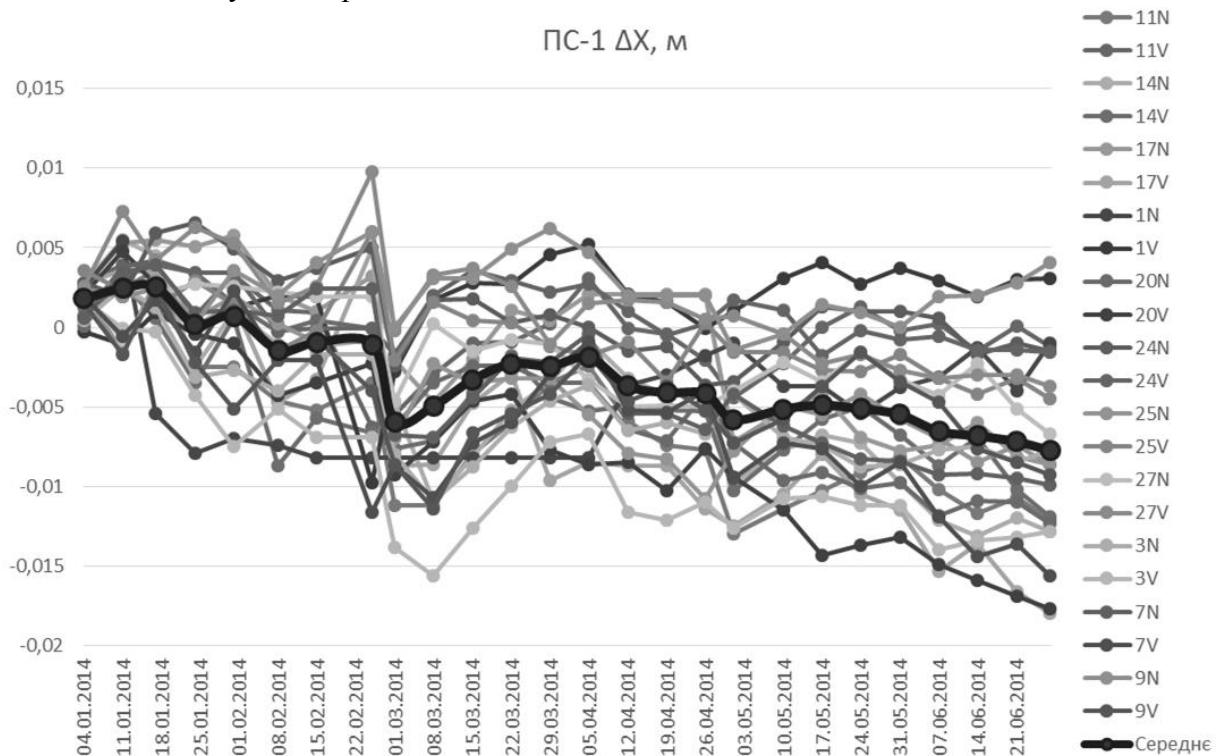


Рис. 3 Графік переміщень для підпірної стіни ПС-1 після останнього циклу спостережень

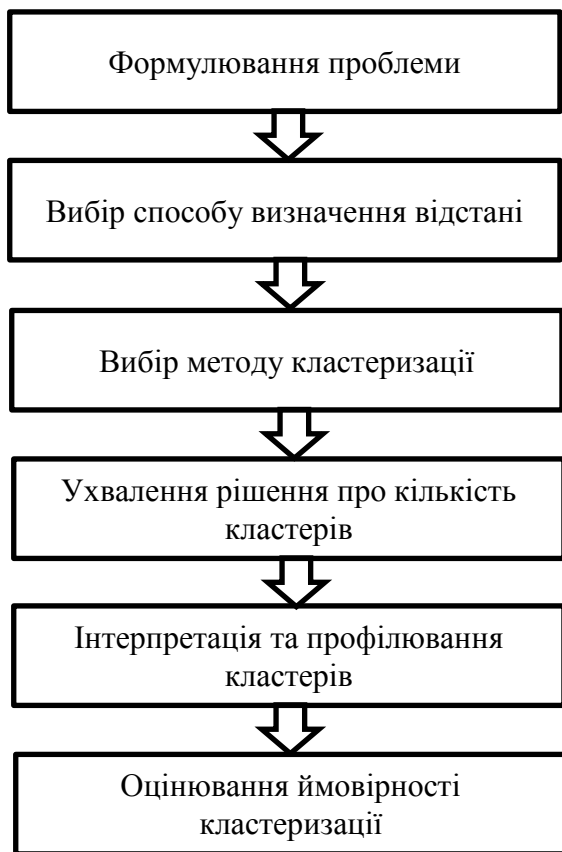


Рис. 4. Етапи кластерного аналізу

Як видно з представлених графіків, переміщення є досить нерівномірними і мають суттєво відмінні значення для різних частин підпірної стінки. Для того щоби визначити ділянки підпірної стіни, які, можливо, потребують підсилення, доцільно використати кластерний аналіз. Технологічна схема кластерного аналізу наведена на рис. 4.

Для аналізу використано результати вимірювання переміщень найдовшої підпірної стінки ПС-1. Метою нашого дослідження є оцінювання результатів кластерного аналізу в разі застосування різних методів кластеризації та мір схожості. Відомо декілька методів визначення відстаней або міри схожості об'єктів. Наведемо міри, що були використані в нашому дослідженні.

Відстань Евкліда. Евклідова відстань між двома точками – це найменша відстань між ними:

$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2}.$$

Квадрат відстані Евкліда. Завдяки квадрату краще враховуються великі значення різниці. Цю міру треба використовувати для побудови кластерів за допомогою центроїдного і медіанного методів, а також методу Уорда:

$$d(X, Y) = \sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2.$$

Кореляція між векторами значень (кореляція Пірсона):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)S_X S_Y}.$$

Косинус векторів відстаней. Як і для кореляційних коефіцієнтів Пірсона, область значень цієї міри знаходиться між -1 та +1:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i Y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i^2) \sum_{i=1}^m (Y_i^2)}}.$$

Відстань Чебишева. Різницею двох спостережень є абсолютне значення максимальної різниці послідовних пар змінних, відповідних цим спостереженням.

Блок. Ця дистанційна міра визначається сумою абсолютних різниць пар значень.

$$d(X, Y) = \sum_{i=1}^m |X_i - Y_i|.$$

Відстань Мінковського:

$$d(X, Y) = \left(\sum_{i=1}^m |X_i - Y_i|^r \right)^{\frac{1}{r}}.$$

Основними дослідженими методами кластеризації є такі.

- *Спосіб зв'язку за методом медіан* – метод, схожий на метод центроїдного зв'язку. Однак за методом центроїдного зв'язку центроїд нового кластера виходить як зважене середнє центроїдів обох вихідних кластерів, причому кількість спостережень вихідних кластерів утворюють ваговий коефіцієнт. У способі зв'язку за методом медіан обидва вихідних кластери беруть з однаковою вагою.

- *Метод середнього зв'язку* (між групами). Міжгруповий зв'язок означає, що дистанція між кластерами дорівнює середньому значенню дистанцій між усіма можливими парами спостережень, причому одне спостереження беруть з одного кластера, а друге – з іншого. Інформацію, потрібну для розрахунку відстані, знаходять на підставі всіх теоретично можливих пар спостережень.

- *Метод зв'язку Уорда* полягає в тому, що спочатку в обох кластерах для всіх наявних спостережень виконують розрахунок середніх значень окремих

змінних. Потім обчислюють квадрати Евклідових відстаней від окремих спостережень кожного кластера до цього кластерного середнього значення. Ці відстані підсумовують. Потім в один новий кластер об'єднують ті кластери, від об'єднання яких отримаємо найменший приріст загальної суми відстаней.

- *Метод середнього зв'язку* (всередині груп) – це метод, за яким відстань між двома кластерами розраховують на підставі всіх можливих пар спостережень, що належать обом кластерам, причому враховують так само і пари спостережень, які утворюються всередині кластерів.

- *Метод зв'язку найближчих точок* – метод, згідно з яким відстань між двома кластерами визначають як найменшу відстань між парою значень спостережень, розміщених одне до одного якнайближче, причому кожне спостереження беруть зі свого кластера (рис. 5).

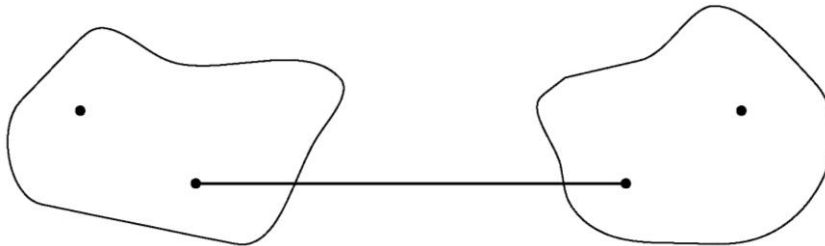


Рис. 5. Метод зв'язку найближчих точок

- *Метод зв'язку віддалених точок* – метод, за яким відстань між двома кластерами визначають як відстань між найбільш віддаленими один від одного значеннями спостережень, причому кожне спостереження беруть зі свого кластера (рис. 6).

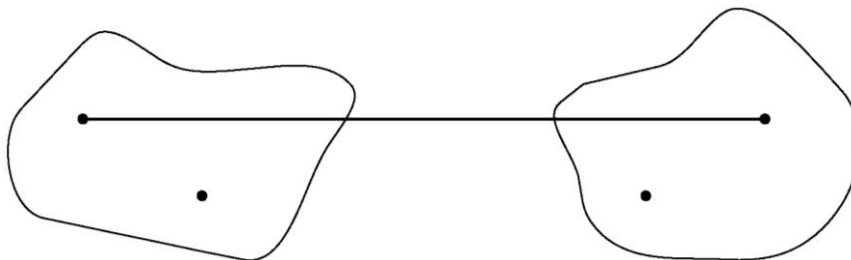


Рис. 6. Метод зв'язку віддалених точок

- *Метод центроїдного зв'язку* означає, що в обох кластерах розраховують середні значення змінних, до яких належать спостереження. Потім відстань між двома кластерами розраховують як дистанцію між двома усередненими спостереженнями (рис. 7).

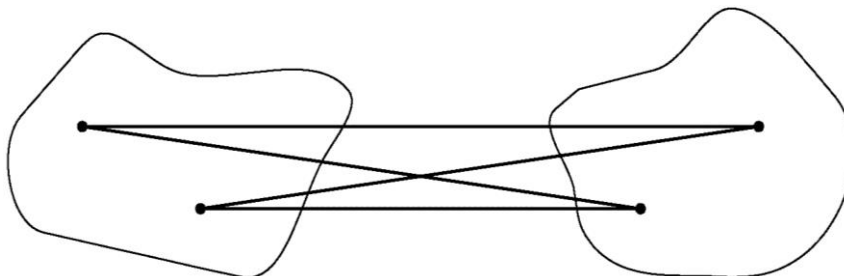


Рис. 7. Метод середнього зв'язку

Загалом виконано 49 розрахунків. Далі наводимо ті з них, які дали змогу отримати найбільш адекватні результати.

На рис. 8 і 10 наведено результати кластерного аналізу з використанням різних мір схожості. На підтвердження результатів і для наочності процесу кластеризації на рис. 9 і 11 наведено дендрограми поділу на кластери.

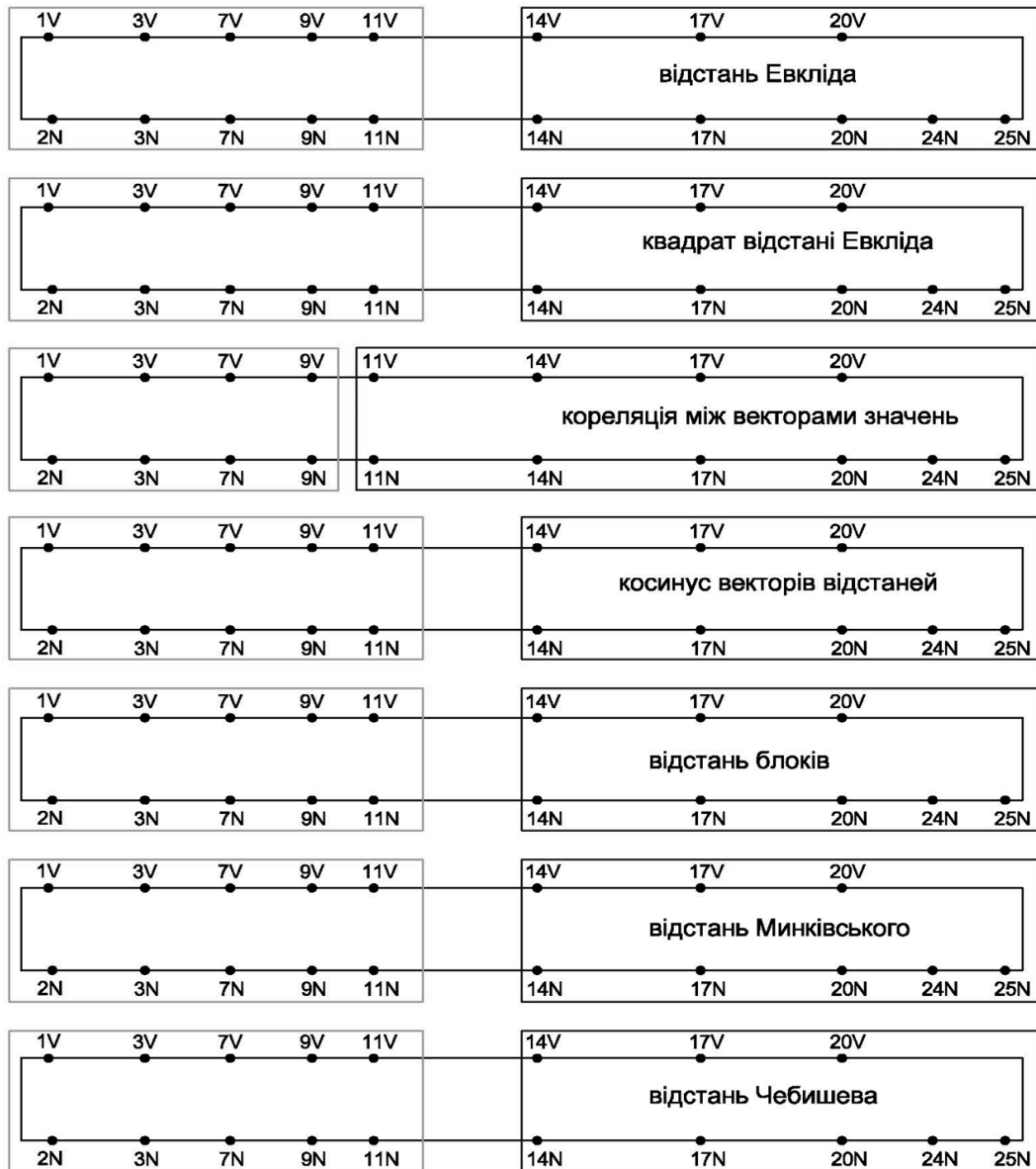


Рис. 8. Метод зв'язку вiддалених точок

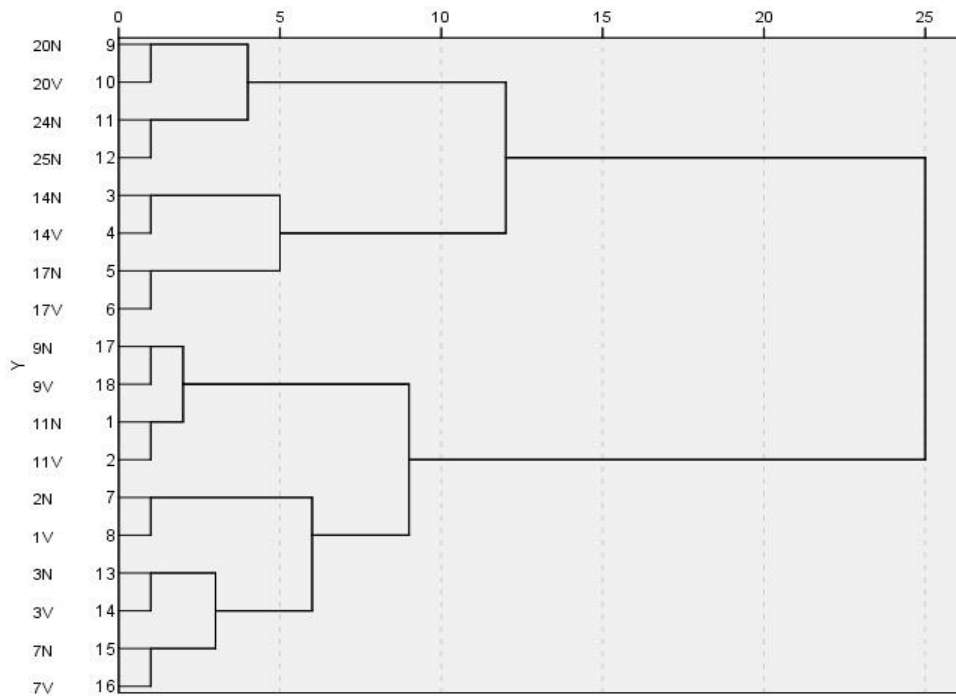


Рис. 9. Дендрограма за критерієм відстані Евкліда

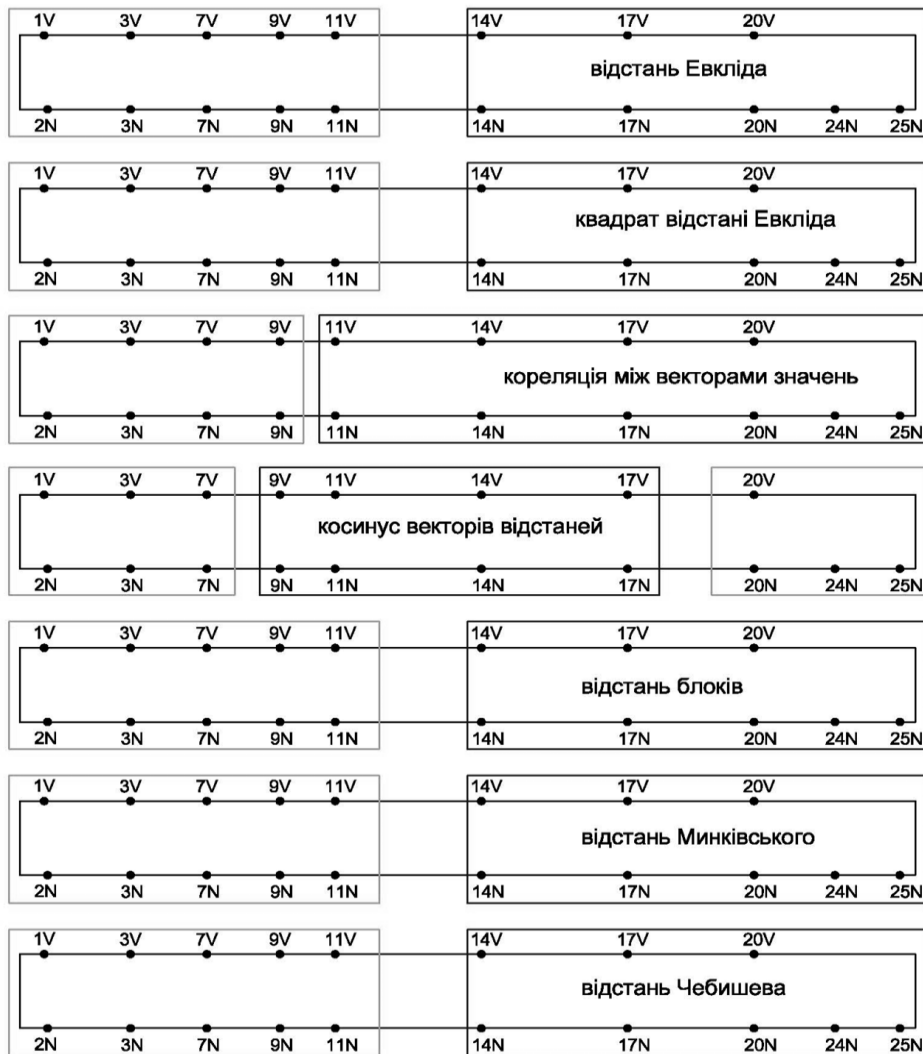


Рис. 10. Метод центроїдного зв'язку

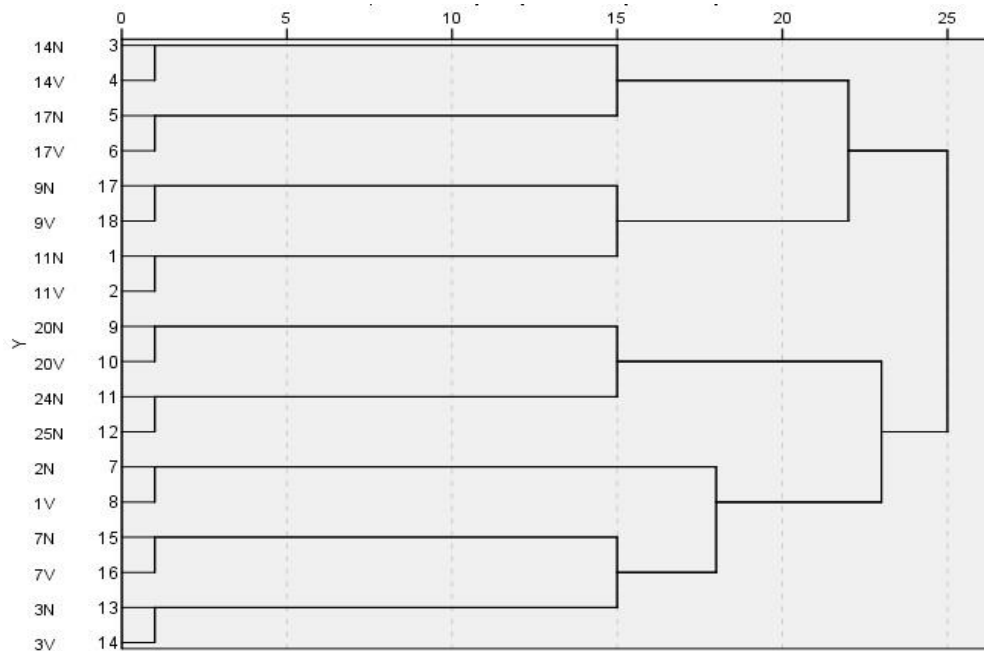


Рис. 11. Дендрограма за критерієм косинус кута між двома векторами значень

Очевидно, що найбільш якісні результати отримано для методу зв'язку віддалених точок. Завдяки кластерному аналізу виявлено два блоки, на які поділяється підпірна стіна і в межах яких переміщення є рівномірними. Для першого блока середнє значення переміщення дорівнює 2 мм, для другого – 12 мм, різниця середніх значень – 10 мм. Якщо розрахункова точність визначення переміщень становить 3 мм, то різниця середніх значень перевищує потрійне значення точності визначення переміщень 9 мм, отже, ймовірно, що окремі частини стіни переміщуються за різними законами. За результатами дослідження запропонованих методів можна сформулювати певні висновки.

Висновок. У представленій роботі за результатами експериментальних переміщень виконано дослідження методу кластерного аналізу для визначення зон рівномірних переміщень протизсувних споруд. Загалом відомо, що за великої кількості спостережуваних точок та великої кількості вимірів дуже складно визначити зони, в межах яких закон переміщень є рівномірним. Виконані дослідження засвідчили, що метод кластерного аналізу може бути успішно застосований для вирішення цієї проблеми. Досліджено такі методи кластеризації: спосіб зв'язку за методом медіан; метод середнього зв'язку; метод зв'язку Уорда; метод середнього зв'язку; метод зв'язку найближчих точок; метод зв'язку віддалених точок; метод центроїдного зв'язку. Найбільш ефективними виявились методи зв'язку віддалених точок та центроїдного зв'язку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Григоренко А.Г. Измерение смещений оползней / А.Г. Григоренко – М.: Недра, 1988. – 144 с.
2. Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем: монография / В.А. Середович,

В.К. Панкрушин, Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.Ф. Ловягин. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 356 с.

3. *Кузнецов А.И.* Разработка метода определения поверхности скольжения оползня по данным геодезического мониторинга [Автореферат] : дис. ... кандидата техн. наук: 05.24.01 / А.И. Кузнецов. — М., 2013. — 24 с.

4. *Левчук Г.П.* Прикладная геодезия. Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ. / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, В. Г. Конусов; под ред. Г. П. Левчука. – М.: Недра, 1981. – 440 с.

5. *Мазуров Б.Т.* Математическое моделирование по геодезическим данным: монографія / Б.Т. Мазуров. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 127 с.

6. *Наследов А.* IBM SPSS Statistics 20 и AMOS: профессиональный статистический анализ данных / А. Наследов – СПб.: Питер, 2013. – 416 с.

7. *Павловская О.Г.* Анализ и оценка по геодезическим данным динамики оползней в условиях проведения взрывных работ и разгрузки склонов [Автореферат] : дис. ... кандидата техн. наук: 25.00.32 / О.Г. Павловская. — Новосибирск, 2012. — 24 с.

8. *РД 07-166-97.* Инструкция по наблюдениям за сдвигами земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений / Госгортехнадзор России; НТЦ «Промышленная безопасность». – 2002. – Вып. 8 Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль. – Серия 07 «Нормативные документы по вопросам охраны недр и геолого-маркшейдерского контроля».

9. *Симонян В.В.* Обоснование точности и разработка методов математико-статистического анализа геодезических наблюдений за смещениями оползней [Автореферат] : дис. ... кандидата техн. наук: 25.00.32 / В.В. Симонян. — Новосибирск, 2008. — 24 с.

10. *Скнарина Н.А.* Разработка геоинформационной технологии исследования оползневых процессов [Автореферат]: дис. ... кандидата техн. наук: 25.00.32 / Н.А. Скнарина. – М., 2012. - 24 с.

11. *Тихонов А.В.* Научно-методические основы изучения глубоких оползней г. Москвы с применением высокоточных методов [Автореферат] : дис. ... кандидата геолого-минерал. наук: 25.00.32 / А.В. Тихонов. М., 2011. - 24 с.

REFERENCES

1. *Grigorenko, A.G.* Izmerenie smeshhenij opolznej [Measurement of landslides displacements]. Moscow: Nedra, 1988, 144 p.

2. *Identifikacija dvizhenij i naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija samoorganizujushhihsja geodinamicheskikh sistem* [Identification of the movements and the stress-strain state of self-organizing systems geodynamic]. V.A. Seredovich, V.K. Pankrushin, Ju.I. Kuznecov, B.T. Mazurov, V.F. Lovjagin. Novosibirsk: SGGGA, 2004, 261 p.

3. *Kuznecov, A.I.* (2013) Razrabotka metoda opredelenija poverhnosti skol'zhenija opolznja po dannym geodezicheskogo monitoringa [Development of the method for determining the sliding surface of landslide according to geodetic monitoring]. Moscow, 24 p.

4. *Levchuk, G.P. Novak, V.E. Konusov, V.G. Prikladnaja geodezija. Osnovnye metody i principy inzhenerno-geodezicheskikh rabot* [Applied Geodesy. Basic principles and methods of engineering and surveying]. Moscow: Nedra, 1981, 440 p.

5. *Mazurov, B.T. Matematicheskoe modelirovanie po geodezicheskim dannym* [Mathematical modeling for geodetic data]. Novosibirsk: SGGA, 2013, 127 p.

6. *Nasledov, A. IBM SPSS Statistics 20 i AMOS: professional'nyj statisticheskij analiz dannyh* [IBM SPSS Statistics 20 and AMOS: professional statistical analysis]. S.Petersburg: Piter, 2013, 416 p.

7. *Pavlovskaja, O.G. (2012). Analiz i ocenka po geodezicheskim dannym dinamiki opolznejj v uslovijah provedenija vzryvnyh rabot i razgruzki sklonov* [Analysis and evaluation on geodetic data landslide dynamics in conditions of blasting and unloading slopes]. Novosibirsk, 24 p.

8. *RD 07-166-97. Instrukcija po nabljudenijam za sdvizhenijami zemnoj poverhnosti i raspolozhennymi na nej ob'ektami pri stroitel'stve v Moskve podzemnyh sooruzhenij. Gosgortehnadzor Rossii NTC «Promyshlennaja bezopasnost'»* [Instruction by observations of displacement of the earth's surface and objects placed on it during the construction of underground structures in Moscow]. Series 07 Regulations on the protection of mineral resources and geological survey control / Release 8 Security of mineral resources and geological survey control. 2002.

9. *Simonjan, V.V. (2008). Obosnovanie tochnosti i razrabotka metodov matematiko-statisticheskogo analiza geodezicheskikh nabljudenij za smeshhenijami opolznejj* [Justification of the accuracy and development of methods for mathematical and statistical analysis of geodetic observations of landslide displacements]. Novosibirsk, 24 p.

10. *Sknarina, N.A. (2012). Razrabotka geoinformacionnoj tehnologii issledovanija opolznevyh processov* [Development of geoinformation technology research of landslide processes]. Moscow, 24 p.

11. *Tihonov, A.V. (2011). Nauchno-metodicheskie osnovy izuchenija glubokih opolznejj g. Moskvy s primeneniem vysokotochnykh metodov* [Scientific and methodological foundations for the study of deep landslides in Moscow with high-precision methods]. Moscow, 24 p.

А. М. Хайлак

ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН РАВНОМЕРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований горизонтальных перемещений противоположных сооружений. На примере результатов геодезического мониторинга за перемещениями противоположных сооружений была исследована эффективность применения кластерного анализа для определения зон равномерных перемещений. Изложены основы кластерного анализа и алгоритмы кластеризации. Приведены основные, наиболее

эффективные методы кластеризации. Исследованы различные методы кластеризации по материалам геодезического мониторинга подпорной стенки в Киеве. В рамках каждого метода кластеризации было проверено эффективность применения различных методов определения расстояний или мер сходства объектов. Для анализа по каждому из критериев в рамках различных методов кластеризации были построены дендрограммы. В результате анализа для исследуемого объекта были определены наиболее эффективные методы кластеризации: метод связи удаленных точек и метод центроидной связи. Выявлено также, что для каждого из этих методов результаты кластеризации по разным мерам сходства являются практически одинаковыми.

Ключевые слова: оползень, кластерный анализ, методы кластеризации, мера сходства, горизонтальные перемещения, дендрограмма.

A.M. Khailak

THE USING OF CLUSTER ANALYSIS FOR IDENTIFICATION OF UNIFORM AREAS OF ANTI LANDSLIDES STRUCTURES DISPLACEMENTS

The results of experimental studies of antilandslide structures horizontal displacements were listed. As example of geodetic monitoring the antilandslide structures displacements, the effectiveness of the results of cluster analysis to determine the areas of uniform displacements was investigated. Fundamentals of cluster analysis and clustering algorithms were given. The basic and most effective clustering methods were listed. The different methods of clustering based on geodetic monitoring of a retaining wall at Kiev were researched. Within each cluster method has been tested the efficiency of various methods for determining distances or measure the similarity of objects. For the analysis for each of the criteria in the various methods of clustering dendrogram was constructed. As a result of analysis for the object, we identified the most effective clustering methods: remote method of communication points and the centroid method of communication. For each of these methods of clustering on different measures of similarity provided identical results.

Keywords: landslide, cluster analysis, clustering methods, similarity measure, horizontal displacements, dendrogram.