

С. Б. ХВЕДЧЕНЯ

**ПРИМЕНЕНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО  
МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОХРАНЫ  
ПОДЗЕМНЫХ ПАМЯТНИКОВ  
ИСТОРИИ И КУЛЬТУРЫ**

На территории СССР находятся свыше 200 тыс. памятников истории, архитектуры и археологии. Важное место среди них занимают подземные — пещерные лабиринты Славяноворского заповедника, пещерные монастыри и целые подземные города Крыма и Кавказа: Мангуп, Чуфут-Кале, пещеры Гареджи и многие другие. Только в районе Киева обнаружено около 50 пещер, в том числе и уникальные Ближние и Дальние пещеры Киево-Печерского заповедника, созданные в XI веке.

Освоение новых и реконструкция старых территорий приводят к разрушению природной среды, что влечет за собой изменения геометрических параметров подземных памятников истории. В этой связи возникает необходимость разработки комплекса мероприятий по их сохранению в условиях отрицательного влияния техногенных факторов [3]. Учитывая современный уровень развития картографической науки, можно применять картографический метод исследования в общем комплексе охраны подземных памятников истории и культуры.

Картографический метод исследования способствует получению необходимой качественной и количественной информации. Выводы и результаты картографического исследования значительно расширяют наши представления как об эволюции

изучаемого исторического объекта, так и о нарушениях его первоначальных геометрических параметров твердых контуров.

Анализ разновременных картографических изображений подземных памятников значительно облегчает работу исследователя, занимающегося изучением истории развития и задачами сохранения культурного наследия. Для решения данных вопросов можно использовать все известные приемы картографического анализа: описания, графические и графоаналитические

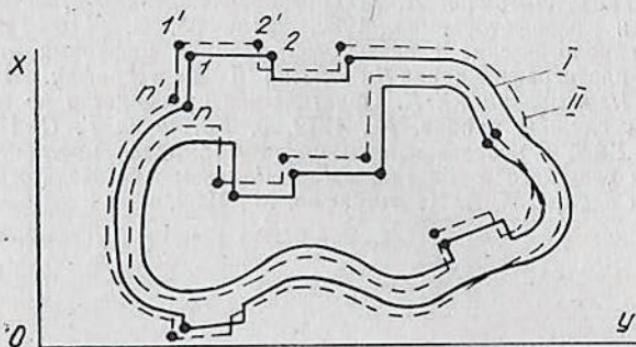


Рис. 1. Определение изменений геометрических параметров пещер в плане:

I — первоначальное положение контуров; II — смещение контуров.

приемы, математико-картографическое моделирование [2] и другие. Важно отметить, что все они взаимодополняемы и взаимосвязаны и поэтому применяются в совокупности.

Исследование разновременных картографических изображений подземных памятников истории позволяет изучить их возникновение, развитие, изменение во времени и перемещение в пространстве. Сопоставляя картографические изображения пещерных лабиринтов, составленные в моменты времени  $t_j$  и  $t_{j+1}$  ( $j=1, k$ ), можно выявить изменения, произошедшие за период  $\Delta t_{j,j+1} = t_{j+1} - t_j$ . Изменения объекта исследования оценивают картометрическим способом, устанавливают их направленность, прогнозируют тенденции развития этого процесса.

Пусть координаты некоторой  $i$ -й точки объекта на планах, составленных в моменты времени  $t_j$  и  $t_{j+1}$ , будут соответственно  $X_j$ ,  $Y_j$  и  $X_{j+1}$ ,  $Y_{j+1}$  (рис. 1). Следовательно, за период  $\Delta t_{j,j+1} = t_{j+1} - t_j$  координаты этой точки имеют приращения

$$\Delta X_{j, j+1} = X_{j+1} - X_j, \quad \Delta Y_{j, j+1} = Y_{j+1} - Y_j. \quad (1)$$

Естественно, что наиболее достоверные данные о деформации объекта можно получить при сопоставлении картографических изображений, составленных по единым принципам, в одном масштабе и с одинаковой точностью.

Изучение разновременных картографических изображений позволяет определить не только значения плановых деформаций, но и направление, и среднюю их скорость. При этом счи-

тают, что значение деформации равно алгебраической сумме всех деформаций за данный период времени, а скорость смещений за этот промежуток времени остается постоянной [2].

Высотные деформации подземных памятников истории и культуры можно получить, сравнивая разновременные и равные по точности профиля. В моменты времени  $t_j$  и  $t_{j+1}$   $i$ -й точке объекта соответствуют высотные отметки  $Z_j$  и  $Z_{j+1}$  (рис. 2).

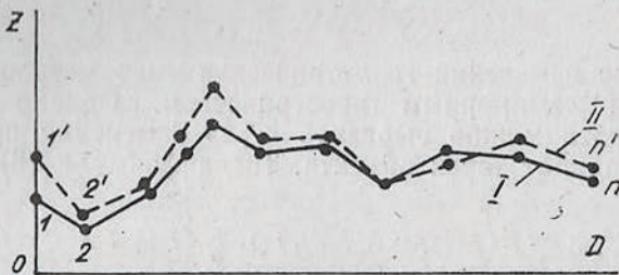


Рис. 2. Определение изменений геометрических параметров пещер по высоте.

Тогда за период  $\Delta t_{j,j+1} = t_{j+1} - t_j$  высотная отметка точки изменяется на

$$\Delta Z_{j, j+1} = Z_{j+1} - Z_j. \quad (2)$$

Наиболее полную информацию о деформациях подземных памятников истории дают сопоставления разновременных трехмерных изображений объекта. Сравнение пространственных

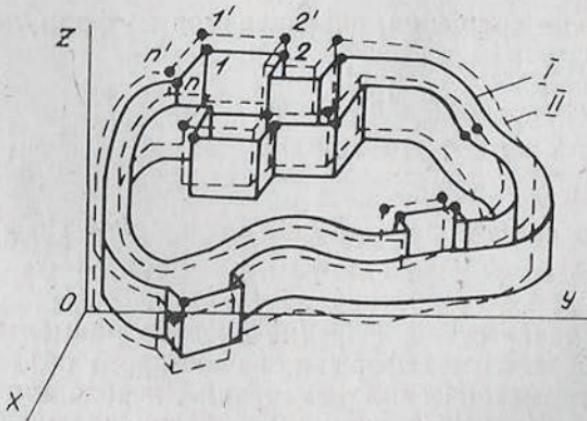


Рис. 3. Определение изменений геометрических параметров пещер в пространстве.

координат характерных точек позволяет изучить динамику, закономерности изменения геометрических характеристик подземных сооружений и определить линейные перемещения в системе координат XYZ (рис. 3). В каждой точке объекта можно получить плановые и высотные деформации по формулам (1) и (2). Но для изучения изменения объекта недостаточ-

но, одних линейных величин, необходимо еще определить наклон объекта. Эта задача связана с нахождением углов наклона их систем координат или углов Эйлера  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ .

Таким образом, положение объекта в пространстве определяют шесть величин  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $\psi$ ,  $\theta$  и  $\varphi$ . Следовательно, изменения геометрических параметров некоторого объекта в пространстве выражается следующей зависимостью:

$$\Delta l_{j, j+1} = f(X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi, t), \quad (3)$$

т. е. процесс изменения геометрических параметров объекта описывается семимерным пространством. Однако значения углов поворота можно выразить через изменения пространственных координат точек объекта. Тогда формула (3) приобретает вид

$$\Delta l_{j, j+1} = f(\Delta X_{j, j+1}, \Delta Y_{j, j+1}, \Delta Z_{j, j+1}, \Delta t_{j, j+1}), \quad (4)$$

т. е. с точки зрения картографии процесс изменения геометрических параметров целиком и полностью определяется четырехмерным пространством.

Значения углов  $\psi$ ,  $\theta$  и  $\varphi$  позволяют установить взаимосвязь между координатами объекта, полученными в моменты времени  $t_j$  и  $t_{j+1}$  по (3)

$$\begin{vmatrix} X_{j+1} \\ Y_{j+1} \\ Z_{j+1} \end{vmatrix} = R \begin{vmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где  $R$  — матрица вращения, определяемая по формуле [1]

$$R = \begin{vmatrix} \cos \psi \cos \theta & & \\ \sin \psi \cos \varphi - \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & & \\ \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi & & \\ & -\sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ & \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & -\cos \theta \sin \varphi \\ & \cos \psi \sin \varphi - \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{vmatrix}, \quad (6)$$

В общем случае с точки зрения способа наименьших квадратов для определения деформации некоторого объекта по результатам картометрических измерений необходимо определить деформационную матрицу из решения следующей системы уравнений:

$$Al_{j+1} - l_j = V, \quad (7)$$

где  $A$  — деформационная матрица вращения;  $l_j$  и  $l_{j+1}$  — значения векторов между одноименными точками на моменты времени  $t_j$  и  $t_{j+1}$ ;  $V$  — вектор пространственных перемещений.

Решение системы (7) выполняют с соблюдением условия

$$V^T p V = \min, \quad (8)$$

где  $V^t$  — матрица, транспонированная по отношению к матрице  $V$ ;  $p$  — диагональная матрица весов результатов картометрических измерений.

Такой путь приводит к составлению нормальных уравнений и решению их одним из известных в линейной алгебре способов. Однако, учитывая то обстоятельство, что углы вращения объекта  $\psi, \theta, \varphi$  незначительны, при разложении их тригонометрических функций в ряд Тейлора можно ограничиться только первыми членами разложения. Это обстоятельство существенно упрощает определение элементов матрицы вращения и приводит к следующим результатам:

$$\begin{aligned}\Delta X_{j, j+1} &= X_{j+1} - X_j, & \Delta Y_{j, j+1} &= Y_{j+1} - Y_j, \\ \Delta Z_{j, j+1} &= Z_{j+1} - Z_j.\end{aligned}\quad (9)$$

Полученная система уравнений обеспечивает простое определение элементов деформационной матрицы и может быть широко использована при картографических исследованиях деформаций подземных памятников истории и культуры по их разновременным картографическим изображениям.

Определение плановых и высотных деформаций подземных памятников истории и культуры производилось на примере сравнительного анализа разновременных картографических изображений пещерных лабиринтов Киево-Печерского государственного историко-культурного заповедника, расположенного на крутых склонах Днепра, в оползневой зоне.

Данное картографическое исследование состояло из таких последовательных этапов: выявление разновременных планов и профилей пещер заповедника, вероятностно-статистический анализ их точности, сравнительный анализ разновременных планов и профилей пещер, составление итоговой документации.

В процессе целенаправленного поиска выявлено более 20 картографических изображений Ближних и Дальних пещер заповедника XVII—XX веков. Анализ их геометрической точности, проведенный с применением математической статистики, позволил сделать вывод о пригодности для определения плановых и высотных деформаций картографических изображений 1825, 1890, 1951, 1979 и 1984 гг. [4]. В связи с тем что планы 1825 и 1890 гг. составлены в масштабе 1 дюйм:10 футов ( $\sim 1:120$ ), а остальные — в масштабе 1:100, возникла необходимость их пересоставления. Переносилось картографическое изображение с помощью универсального топографического проектора УТП-2 с диапазоном изменения масштаба проецирования 1:0,25...1:4 с автоматической установкой резкости. Средняя квадратическая ошибка переноса точек  $\pm 0,20 \dots 0,25$  мм.

Сравнительный анализ разновременных картографических изображений производили путем совмещения их копий, составленных на прозрачном материале в масштабе 1:100. Основой для сравнительного исследования послужили материалы горногеометрической съемки Ближних и Дальних пещер заповедни-

ка, произведенной Киевским госуниверситетом в 1984 г. Изменения геометрических параметров в плане и по высоте определяли картометрическим способом. По результатам исследования составлены итоговые планы смещений контуров и таблицы значений деформаций.

Сравнительный анализ разновременных планов и профилей пещер заповедника позволил не только определить значения и направления плановых и высотных деформаций, проследить динамику их развития за 160 лет, но и прогнозировать дальнейшее изменение геометрических параметров твердых контуров.

Однако выводы данного картографического исследования не окончательны и требовали дополнительных непосредственных измерений в натурных условиях. С этой целью в районе пещер произведены инструментальные наблюдения. Результаты многолетних геодезических измерений подтвердили выводы сравнительного анализа разновременных картографических изображений.

Совместное изучение плановых и высотных деформаций пещер заповедника картографическим и геодезическим методами способствовало разработке системы мероприятий по сохранению этого уникального памятника истории и культуры. После проведения целого ряда инженерных работ — постройки дренажной штолни для отвода грунтовых вод и упорядочения ливнестоков — положение на данном участке территории заповедника стабилизировалось, что подтверждается наблюдениями за положением грунтовых реперов и осадочных марок, расположенных в районе пещер.

К сожалению, на данном этапе мы еще не имеем разновременных трехмерных картографических изображений подземных памятников истории, поэтому рассмотренные выше приемы определения изменений геометрических параметров в пространстве носят пока только теоретический характер, однако их практическое осуществление не вызывает каких-либо затруднений.

1. Баран П. И. Обобщенный метод исследования деформации сооружений в пространстве // Инженерная геодезия. 1984. Вып. 27. С. 6—10.
2. Берлянт А. М. Образ пространства: карта и информация. М., 1986.
3. Пашкин Е. М., Бессонов Г. Б. Диагностика деформации памятников архитектуры. М., 1984.
4. Хведченя С. Б. Статистический анализ картографических изображений подземных памятников истории и культуры. // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1988. Вып. 48. С. 117—121.

Статья поступила в редакцию 22.04.88